Die Unzulänglichkeit der heutigen Klinostaten für reizphysiologische Untersuchungen

VON

PH. VAN HARREVELD.

Aus dem Botanischen Laboratorium der Universität Groningen.

EINLEITUNG.

Gelegentlich einer Untersuchung über die Perzeption des geotropischen Reizes in Pflanzen stellte es sich heraus, dass der von mir benutzte Klinostat nicht gleichmässig rotierte. Dieser Fehler erwies sich als so gross, dass die Resultate meiner Untersuchung, die im Jahre 1904 stattfand, ganz zweifelhaft wurden.

Ich versuchte deshalb, einen besseren Klinostaten aufzufinden. Als ich die Gleichmässigkeit der Rotation bei mehreren dieser Instrumente untersuchte, zeigten sie jedoch alle denselben Fehler, sei es in verschieden hohem Grade. Ausser dem Pfefferschen und dem Wortmannschen Klinostaten erwies sich auch ein Klinostat der von einem Elektromotor getrieben wurde als für meinen Zweck untauglich. Es blieb mir dadurch keine Hoffnung übrig, dass die sonst noch bestehenden Klinostaten genügendes leisten würden.

Da stand mir nur der Weg offen, einen neuen Klinostaten anzufertigen, nach anderen Prinzipien gebaut und die entdeckten Unvollkommenheiten nicht mehr zeigend.

Dieses Instrument steht jetzt fertig da, und es wird seine Konstruktion nach genügender Erprobung in nicht zu langer Zeit veröffentlicht werden. In der vorliegenden Abhandlung prüfte ich die heutigen Klinostaten hinsichtlich der Gleichmässigkeit ihrer Rotation. Auch wird darin untersucht, welche Hindernisse für die reizphysiologische Forschung aus den entdeckten Ungleichmässigkeiten resultieren. Es wird sich herausstellen, dass die Empfindlichkeit der Pflanzen für eine periodische Ungleichmässigkeit in der Rotation unerwartet gross ist.

Den Begriff Klinostat fasse ich selbstverständlich auf nach der Bestimmung, welche sein eigentlicher Erfinder J. Sachs dafür aufstellte. Der Klinostat ist danach ein Instrument, das eine Last gleichmässig um eine Achse zu rotieren vermag mit einer Umlaufzeit, welche ungefähr zwischen einer Minute und einer Stunde liegt.

Behufs der Ausschliessung geotropischer Krümmungen wird die Achse horizontal gestellt. Ich werde in der vorliegenden Untersuchung hauptsächlich die geotropische Empfindlichkeit der Pflanzen und die horizontale Stellung der Achse ins Auge fassen.

Die Achse des Klinostaten, auf welche die Pflanzen befestigt werden, nenne ich die Umdrehungsachse, um sie von den übrigen Achsen des Instrumentes zu unterscheiden.

Die vorliegende Untersuchung wurde unternommen im botanischen Laboratorium von Professor J. W. Moll zu Groningen. Sofern die Hilfsmittel dieses vorzüglich eingerichteten Institutes nicht genügten, wurde mir der Gebrauch gestattet von Instrumenten aus den Laboratorien der Professoren H. Haga, H. J. Hamburger und G. Heymans dahier. Die Professoren J. M. Janse in Leiden und F. A. F. C. Went in Utrecht leihten mir ihre Klinostaten. Ich bringe allen denjenigen, welche diese Untersuchung gefördert haben, meinen besten Dank.

KAPITEL I.

Die Prinzipien im Bau der bis jetzt konstruierten Klinostaten.

Seit mehr als einem Jahrhundert hat man botanische Untersuchungen angestellt mit Hülfe der Rotierung von Pflanzen. Dazu sind sehr verschiedene Vorrichtungen konstruiert worden. Die ältesten dieser Vorrichtungen beanspruchen nur historisches Interesse, weshalb sie hier nur eine kurze Erwähnung finden werden.

Im Jahre 1794 liess **J. Hunter** eine Bohne wachsen in einem zylindrischen fussweiten Körbchen mit Erde, das in steter Drehung um eine horizontale Achse begriffen war [1]. Die Achse ruhte in zwei Einschnitten im Rande eines grossen Fasses mit Wasser. Das Wasser floss langsam durch ein kleines Loch nahe am Boden aus dem Fasse, welches je nach 12 Stunden wieder gefüllt wurde. Das freie Ende einer um das Körbchen gewundenen Schnur war mit einem schwimmenden Gewichte verbunden. Je nachdem das Gewicht zugleich mit dem Wasserspiegel sank, drehte das Körbchen rund. Dabei wurde eine Umdrehung in ungefähr acht Stunden vollendet.

Diese Vorrichtung ist zwar noch sehr primitiv, doch beantwortet sie ganz an der Definition eines Klinostaten.

---

1) Zitiert nach Fr. Darwin, On the Power possessed by Leaves of placing themselves at Right Angles to the Direction of Incident Light. The Journal of the Linnean Society, Botany. Vol. 18. 1881. S. 425 und S. 449. Und nach Catalogue of the physiological series of comparative anatomy in the museum of the royal college of surgeons in London, Vol. 5, 1840, S. 11—12.

Die Triebkraft und die Regulierung der Rotation waren sogar sehr konstant.

Th. A. Knight arbeitete in 1806 mit einem senkrecht gestellten Rade von 11 Zoll Durchmesser, das mittelst eines anderen mit Schuppen versehenen Rades von einem Bach getrieben wurde [1]). In Verbindung mit dem ersten Rade stand ein horizontales Rad von gleichem Durchmesser. Das vertikale Rad machte ungefähr 150 Umdrehungen pro Minute, das horizontale Rad 250 pro Minute.

Diese Umdrehungsgeschwindigkeit ist so gross, dass sie eine erhebliche Zentrifugalkraft verursacht. Es muss die von Knight benutzte Vorrichtung deshalb nicht zu den Klinostaten, sondern zu den Zentrifugalapparaten gerechnet werden.

H. Dutrochet [2]) konstruierte ein Uhrwerk, das von einem Gewicht von 270 Pfund getrieben wurde, welches man jede 12 Stunden aufzog. Die Bewegung wurde von Windflügeln reguliert, deren Achse senkrecht stand. Jede der horizontalen Achsen der 5 senkrecht stehenden Räder hatte ein frei hervorstehendes, viereckiges Endstück, worauf eine hölzerne Scheibe gesteckt werden konnte. Die Keimlinge wurden in Glasballons an diese Scheibe befestigt.

Die Schnelligkeit der Rotation in senkrechter Ebene war verschieden je nachdem die Scheibe auf ein schnelleres oder ein langsameres der 5 horizontalen Achsenenden be-

1) Th. A. Knight, On the Direction of the Radicle and Germen during the Vegetation of seeds. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1806, Part I, S. 99—108.

2) H. Dutrochet, Recherches anatomiques et physiologiques sur la structure intime des animaux et des végétaux, et sur leur motilité. Paris, 1824. S. 139 u. f. Dasselbe in H. Dutrochet, Mémoires pour servir à l'histoire anatomique et physiologique des végétaux et des animaux, Tome II, Paris, 1837, S. 39 u. f.

festigt war. Bei einigen Versuchen wurden 40 Umdrehungen pro Minute, bei anderen 30 Umdrehungen pro Stunde [1]) angewendet. Die letztgenannte langsame Rotation verursachte keine merkbare Zentrifugalwirkung bei den Versuchspflanzen und es liegt hier somit wieder eine Klinostatenvorrichtung vor. Die Achse der Windflügel wurde gebraucht für Rotation in horizontaler Ebene. Hier betrug die geringste Schnelligkeit jedoch 54 Umdrehungen pro Minute [2]), was noch der Schnelligkeit eines Zentrifugalapparates entspricht.

A. Wigand erwähnt neben seinen Versuchen mit Zentrifugalapparaten auch einige Versuche mit langsamer Rotation [3]). Die von ihm gebrauchte Vorrichtung war eine Wanduhr. Der Keimboden wurde an den Minutenzeiger oder an den Stundenzeiger befestigt.

W. Hofmeister gebrauchte bei seinen Rotationsversuchen eine so schnelle Drehung [4]), dass man seine Vorrichtungen zu den Zentrifugalapparaten rechnen muss.

In seiner Experimental-Physiologie erwähnt **J. Sachs** [5])

---

1) l. c. S. 147, resp. l. c. S. 45.

2) l. c. S. 143, resp. l. c. S. 43.

3) A. Wigand, Botanische Untersuchungen. Braunschweig, 1854, S. 146.

4) W. Hofmeister, Über die durch die Schwerkraft bestimmten Richtungen von Pflanzentheilen. Berichte über die Verhandl. der kön. sächs. Ges. der Wissenschaften zu Leipzig, Math.-Phys. Classe, 12ter Band 1860, S. 210. (Dasselbe in Pringsheims Jahrbüchern für wiss. Bot., Bd. III, 1863).

W. Hofmeister, Die Lehre von der Pflanzenzelle, Leipzig, 1867, S. 282.

5) J. Sachs, Handbuch der Experimental-Physiologie der Pflanzen, Leipzig, 1865, S. 111.

nur einfache Apparate zum Demonstrieren der Zentrifugalversuchen. Doch erklärt er schon die Wirkung der langsamen Rotation [1]) und in 1871 liess er sich einen Klinostaten konstruieren, den ersten mit dem ausführliche Untersuchungen unternommen wurden.

In 1872 berichtete er über die Versuche, welche er mit der langsamen Rotation unternommen hatte [2]). Die ausführlichere Beschreibung dieser Versuche erfolgte in 1873 und 1874 [3]), jedoch ohne eine eingehende Beschreibung des angewendeten Apparates.

An den hierauf bezüglichen Stellen wurde nur erwähnt, dass die horizontal stehende Achse kontinuierlich und gleichförmig drehte, eine Umdrehung in 10 bis 20 Minuten vollendete [4]) und dass die Drehung stossweise stattfand, den Schwingungen des Pendels am Uhrwerk entsprechend [5]).

H. Müller (Thurgau) gebrauchte in 1876 den Klinostaten von Sachs, ebenfalls ohne das Instrument näher zu beschreiben [6]).

Behufs heliotropischer Untersuchungen wendete Sachs seinen Uhrwerkklinostaten mit senkrechter Achse an. S. H. Vines gebrauchte diese Vorrichtung und bildete sie ab [7]). Der Figur oder der Beschreibung ist jedoch nicht

---

1) l. c. S. 107.

2) J. Sachs, Studien über das Längenwachsthum der Wurzeln. Verhandlungen der physikal.-medicin. Gesellschaft in Würzburg, Neue Folge, Bd. II, 1872, S. 256.

3) J. Sachs, Ueber das Wachsthum der Haupt- und Nebenwurzeln. Arbeiten des botanischen Instituts in Würzburg, Bd. I, Heft III 1873, S. 385 u. f. und Heft IV 1874, S. 584 u. f.

4) l. c. S. 389.

5) l. c. S. 597.

6) H. Müller (Thurgau), Ueber Heliotropismus. Flora, Bd. 59, 1876, S. 67.

7) S. H. Vines, The Influence of Light upon the Growth of unicellular Organs. Arbeiten des bot. Inst. in Würzburg, Bd. II, Heft I 1878, S. 135.

viel näheres zu entnehmen, nur dass das Uhrwerk von einem Gewichte getrieben wurde. In 1879 endlich veröffentlichte Sachs einige genaueren Angaben über das indessen vom ihm verbesserte Instrument [1]. Seine Beschreibung lautet [2]:

„Ein starkes Uhrwerk mit Gewicht und Pendel ist auf der einen kürzeren Seite eines 4-eckigen Holzrahmens von 95 c.m. Länge und 71 c.m. Breite befestigt, der auf vier 120 c.m. hohen Beinen steht. Etwa 5 c.m. über dem Rahmen geht die Rotationsaxe vom Uhrwerk über die Oeffnung des Rahmens hinüber zur entgegengesetzten Seite desselben. Die Axe besteht aus einem 20 m.m. dicken, 83 c.m. langen leichten Messingrohr; mittels eines vierkantigen Loches lässt sie sich auf eine vierkantige Verlängerung der Axe des grössten Rades des Uhrwerkes aufschieben; ihr anderes Ende hat eine conische Höhlung, in welche das conische Ende einer horizontalen Schraube eingreift, welches als Zapfenlager dient; zieht man die Schraube zurück, so lässt sich die Messingaxe leicht aus dem ganzen Apparat herausnehmen. Um sie mittels einer Wasserwage genau horizontal zu stellen (was auch mit dem Holzgestell geschehen muss), ist das die Schraubenmutter enthaltende Stahlstück selbst an einem auf dem Rahmen befestigten Fuss vertical verschiebbar".

„Das Uhrwerk giebt der Axe keine continuirliche, sondern eine in leisen Stössen erfolgende Bewegung, die dem Eingreifen der Zahnräder entsprechen; eine volle Umdrehung erfordert c.a. 20 Minuten und das Gewicht sinkt dabei so langsam, dass das Uhrwerk nur alle 24 Stunden aufgezogen zu werden braucht".

1) J. Sachs, Ueber Ausschliessung der geotropischen und heliotropischen Krümmungen während des Wachsens. Arbeiten des bot. Inst. in Würzburg, Bd. II, Heft II, 1879, S. 209 u. f.

2) l. c. S. 216 und 217.

Die weiteren Angaben betreffen nur die Vorrichtungen zur Befestigung u. s. w. der Pflanzen an die horizontale Achse. Hier wird auch zum ersten Mal der Name Klinostat vorgeschlagen, „ein Wort, welches andeuten soll, dass das Krümmen (κλίνειν) der Pflanzen dadurch sistirt wird [1]."

Eine spätere Form des Sachsschen Klinostaten ist abgebildet in den Vorlesungen [2]) und in den Gesammelten Abhandlungen [3]) von Sachs. Die lange horizontale Achse ist hier nicht über den oben genannten Holzrahmen, sondern zwischen zwei gesondert stehenden kleinen hohen Tafeln aufgestellt.

Ich habe den Sachsschen Klinostaten etwas ausführlicher behandelt wegen zweier Umstände. Erstens ist er ein klassisches Instrument, mit welchem von Sachs grundlegende Untersuchungen angestellt worden sind. Zweitens weicht er in seiner Konstruktion erheblich ab von den späteren Klinostaten, was ihm nicht zum Nachteil gereicht. Es wird im Laufe dieser Untersuchung gezeigt werden, dass er Vorteile bietet über die von einer Feder getriebenen Klinostaten.

Die Beschreibung, welche Sachs von seinem Uhrwerk gegeben, ist eine sehr unvollständige. Auch den genannten Figuren ist nichts genaues über die Konstruktion zu entnehmen. Doch lässt sich aus ihnen mit Wahrscheinlichkeit das Folgende ableiten.

Das Gewicht hängt an einer Flaschenzugrolle und kann nicht tiefer herabsinken als ungefähr 1 Meter. Die Windetrommel enthält daher weniger als 2 Meter des Seiles, was bei einem Durchmesser von etwa 6 cm 10 Windun-

1) l. c. S. 217.

2) J. Sachs, Vorlesungen über Pflanzen-Physiologie, 1ste Aufl. Leipzig, 1882, S. 836 und 2te Aufl. Leipzig, 1887, S. 721.

3) J. Sachs, Gesammelte Abhandlungen über Pflanzen-Physiologie, Bd. II. Leipzig, 1893, S. 993.

gen entspricht. Das Gewicht muss jede 24 Stunden aufgezogen werden. Die Windetrommel macht somit ungefähr 10 Umdrehungen in 24 Stunden oder 1 Umdrehung in 144 Minuten. Die Geschwindigkeit der Umdrehungsachse ist ungefähr 8 Mal so gross. Es folgert sich hieraus, dass das Gewicht nicht unmittelbar auf die Umdrehungsachse wirkt, sondern mittelst einer Übertragung, welche die Umlaufzeit ungefähr 8 Mal verkleinert. Das hierzu nötige Getriebe hat immer einigen Raum im Eingriff der Zähne. Es muss die Last der Umdrehungsachse daher sehr gut zentriert werden, damit der Schwerpunkt beim Passieren seiner höchsten und niedrigsten Stellung nicht plötzlich ein wenig herabsinkt resp. einen Augenblick still steht.

Den Figuren ist nicht zu entnehmen, wie das Aufziehen des Gewichtes stattfindet.

Wenn kein Gegengesperre bei der Trommel angewendet ist, wird die Rotation der Umdrehungsachse jedesmal beim Aufziehen des Gewichtes unterbrochen werden müssen.

Den Bau des Sachsschen Klinostaten fasse ich in den folgenden Prinzipien zusammen:

a. Die Triebkraft ist ein Gewicht und ist somit konstant.

b. Die Regulierung wird von einem Pendel besorgt; sie ist mithin sehr konstant und bis zu einem gewissen Grade unabhängig von der Last und von einem geringen Übergewicht an der Umdrehungsachse. Die Bewegung ist ruckweise.

Nach diesen Prinzipien ist später noch ein sehr einfacher Klinostat erbaut worden von den Professoren **P. Meyer** und **Schönlein** in Neapel. Die Vorrichtung wurde beschrieben und abgebildet von P. Klemm [1]), der sie gebrauchte bei Versuchen unter Wasser mit *Caulerpa.*

1) P. Klemm, Ueber *Caulerpa prolifera.* Flora. Bd. 77. 1893. S. 475 und 476.

Sie bewältigte nur eine geringe Last und bot keine neuen Vorteile. Die Pendeluhr war an einem Stativ hoch über einem Tische befestigt.

Der Figur ist zu entnehmen, dass die Kette des Gewichtes über einen Saitenkonus lief, welcher mittelst einer Schnur die Umdrehungsachse rotieren machte. Durch das langsame Herabsinken des Gewichtes geriet der Saitenkonus in Drehung, wodurch die Umdrehungsachse mittelst der Seiltransmission eine Rotation in 20 Minuten vollendete.

W. Oels bildet eine Vorrichtung ab [1]), wobei die Stundenachse einer grossen, von einem Pendel regulierten Wanduhr als horizontale Umdrehungsachse eines improvisierten Klinostaten funktioniert.

Die Leistungsfähigkeit der Pendelklinostaten ist offenbar eine geringe; es können nur leichte Keimboden, nicht etwa ein Topf mit Erde, um die horizontale Achse durch das Uhrwerk gedreht werden. Wahrscheinlich ist dies wohl die Ursache, dass sonst keiner der späteren Klinostaten nach den genannten Prinzipien konstruiert worden ist.

J. Wiesner gebrauchte in 1878 zwei Klinostaten von sehr einfacher Konstruktion [2]). Sie bestanden aus einem von einer Feder getriebenen Laufwerke, welches in einem flachen sechseckigen Kasten beschlossen war [3]). Die Achse ragte aus dem Deckel hervor und machte bei dem einen Laufwerk eine Umdrehung in einer Viertelstunde, bei dem anderen in einer Stunde. Wenn der Kasten auf einen der 6 Seitenkanten gestellt wurde, stand die Umdrehungsachse

---

1) W. Oels, Pflanzenphysiologische Versuche. Braunschweig, 1893, S. 50.

2) J. Wiesner, Die heliotropischen Erscheinungen im Pflanzenreiche. Denkschriften der kais. Akad. der Wissenschaften in Wien, Math.-Naturw. Classe, Bd. 39, 1879, S. 195.

3) So zeigt es die Abbildung in einem Verzeichnis von J. Nemetz, Mechaniker zu Wien, 1899.

horizontal und war sie geeignet für Ausschliessung der geotropischen Krümmung. Auf das Achsenende wurde dann eine Scheibe befestigt mit vier kreuzweise angeordneten Metallhülsen, welche senkrecht auf die Achse gerichtet waren und in welche kleine Glaszylinder von 2 bis 2½ cm Durchmesser eingepasst wurden zur Aufnahme der Keimboden und Keimlinge. Die Keimlinge wurden somit senkrecht auf der Umdrehungsachse gestellt.

Das Instrument ist in einer etwas stabileren Form abgebildet in Wiesners Elemente der wissenschaftlichen Botanik [1]).

Die Regulierung des Laufwerkes wird von Wiesner nicht angegeben. In dem genannten Lehrbuche erwähnt er jedoch, dass eine Uhr von grosser Triebkraft als Laufwerk gebraucht wurde [2]).

Eine solche Uhr wird gewöhnlich reguliert von einem Ankergang, was warscheinlich auch bei dem Wiesnerschen Klinostaten der Fall ist.

Eine ganze Reihe von Klinostaten sind nach denselben Prinzipien konstruiert worden.

Diese Prinzipien sind:

a. Die Triebkraft ist eine Feder und ist somit nicht ganz konstant.

b. Die Regulierung wird von einem Ankergang besorgt; sie ist mithin ziemlich konstant, doch nicht so unabhängig von der Last und von einem geringen Übergewicht als das Pendel beim Sachsschen Klinostaten. Die Bewegung ist ruckweise.

Von den ähnlich gebauten Klinostaten nenne ich noch die Folgenden.

---

1) J. Wiesner, Elemente der wiss. Bot., Bd. I, Anatomie und Physiologie der Pflanzen, 5te Aufl., Wien, 1906, S. 334.

2) l. c. S. 333.

Fr. Darwin gebrauchte in 1880 einen Klinostaten, der nach den Angaben von **Horace Darwin** konstruiert worden war [1]). Das Instrument wird von ihm abgebildet und ausführlich beschrieben [2]).

Die Triebkraft wird von einem gewöhnlichen Uhrwerk geliefert, welches mittelst einer Seiltransmission die Umdrehungsachse dreht. Je nach der benutzten Schnurscheibe wird eine Umdrehung in 20 oder in 30 Minuten vollendet.

Durch eine besondere Vorrichtung kann die Last sehr gut zentriert werden. Eine Last von 1000 Grammen kann dadurch gedreht werden mit der Gewissheit, dass sie nicht stehen bleiben wird [3]).

Derselbe Klinostat ist auch beschrieben und abgebildet im Leitfaden der praktischen Pflanzenphysiologie von Darwin und Acton [4]).

Der Klinostat, den **W. Detmer** in der ersten Auflage seines pflanzenphysiologischen Praktikums beschreibt und abbildet [5]), ist gerade so konstruiert wie der Darwinsche, nur etwas einfacher. In der zweiten Auflage wird er nicht wieder erwähnt.

W. Pfeffer beschreibt in der ersten Auflage seines Handbuches einen Klinostaten [6]), der durch eine starke

1) Fr. Darwin, On the Power possessed by Leaves of placing themselves at Right Angles to the Direction of Incident Light. The Journal of the Linnean Society, Botany, Vol. XVIII, London, 1881, S. 420 u. f.

2) l. c. S. 449—455.

3) l. c. S. 455.

4) Fr. Darwin and E. H. Acton, Practical Physiology of Plants, Cambridge, 1894, S. 170—173.

5) W. Detmer, Das Pflanzenphysiologische Praktikum, Jena, 1888, S. 304.

6) W. Pfeffer, Handbuch der Pflanzenphysiologie, Bd. II, Leipzig, 1881, S. 305 u. f.

Feder getrieben wurde und selbst bei horizontaler Achse einige Kilo rotieren konnte.

Das Instrument ist in Fig. 33 [1]) abgebildet und ist ungefähr gebaut wie folgt:

Als Triebkraft dient ein Anker-Uhrwerk mit sehr starker Feder, das an der Innenseite des Deckels eines schweren Kastens befestigt ist.

Der Deckel kann in jeder Stellung zwischen horizontal und vertikal festgeschraubt werden mittelst zweier bogenförmigen Schienen. Aus der Aussenseite des Deckels ragen 2 Zapfen hervor, die sich mit einer Schnelligkeit von 15 resp. 30 Minuten drehen. Auf diese Zapfen kann die dünne aus Messing gearbeitete Umdrehungsachse geschoben werden, oder im Fall der senkrechten Stellung eine horizontal stehende Scheibe.

Nach denselben Prinzipien ist auch der Klinostat von **A. Hansen** [2]) konstruiert. Es besteht dieser aus einem „Präcisionslaufwerk mit Ankergang, welches die Achsen in einer halben oder ganzen Stunde in Umdrehung versetzt." „Das Uhrwerk läuft 14 Tage. Der Anker ist mit einem Glasgehäuse bedeckt, welches man öffnet, um nach gänzlichem Ablaufen des Werkes den Anker anstossen zu können." Das Instrument ist in horizontaler und vertikaler Stellung abgebildet und ist für geringere Lasten bestimmt als von dem Pfefferschen Klinostaten rotiert werden können.

W. F. Ganong beschreibt neuerdings noch einen Klinostaten [3]), der dem Wiesnerschen sehr ähnlich ist.

1) l. c. S. 305.

2) A. Hansen, Einige Apparate für physiologische Demonstrationen und Versuche. Flora, Bd. 84, Ergänzungsband, 1897, S. 353—355.

3) W. F. Ganong, New precision-appliances for use in plant physiology. Botanical Gazette, Vol. 37, 1904, S. 302 u. f.

Er besteht aus einem starken Uhrwerk, dessen Achse eine Umdrehung in 15 Minuten macht und das nach einmaligem Aufziehen 2 Tage lang geht.

Diese Umdrehungsachse ragt aus der staub- und wasserdichten Metalldose hervor, worin die Uhr verschlossen ist.

Die Abbildungen zeigen das Instrument in vertikaler, horizontaler und geneigter Lage [1]), indem das ganze Instrument in willkürlicher Stellung an einem Stativ befestigt werden kann. — Die einfachste derartige Ausführung giebt Pfeffer mit den folgenden Worten an [2]):

„Ein sehr einfacher Klinostat, der für manche Zwecke, z. B. für Demonstrationen, brauchbar ist, lässt sich übrigens für einige Mark aus einer sog. amerikanischen Weckeruhr herstellen, an der man durch die Einschaltung einer entsprechenden Zahnradübersetzung z. B. eine Triebachse mit halbstündiger Umdrehungszeit gewinnen kann. Indem an diese ein Glasstab durch Ueberschieben eines kräftigen Gummischlauchstückes befestigt wird, erhält man eine horizontale Welle, an der Keimpflanzen etc. fixirt werden können. Befestigt man ausserdem das Uhrwerk in verstellbarer Weise in einen Metallbügel, so lässt sich der Drehachse eine verticale, geneigte oder horizontale Lage geben."

Die hier beschriebene Vorrichtung wurde mit senkrecht nach unten stehender Achse angewendet und abgebildet von **P. Klemm** [3]).

Die angeführten Beispiele zeigen genügend, dass die Regulierung mittelst eines Ankerganges vielfach bei der Konstruktion von Klinostaten angewendet worden ist.

Doch sind in derselben Zeit einige Klinostaten erbaut worden, welche in anderer Weise reguliert wurden und

---

1) l. c. S. 304 und 305.

2) W. Pfeffer, Handbuch der Pflanzenphysiologie, Bd. II, 2te Aufl., Leipzig, 1904, S. 571.

3) P. Klemm, Ueber *Caulerpa prolifera*. Flora, Bd. 77, 1893, S. 472.

die eine ausgedehntere Verwendung gefunden haben als einer der oben angeführten.

Schon in der ersten Auflage seines Handbuchs fügt Pfeffer an der Erklärung seiner Figur 33 diesen Satz zu [1]: „Um ein ruckweises Drehen zu vermeiden, das jede Pendel- und Ankeruhr hervorbringt, dient mir ein durch Flügel regulierter, übrigens ähnlich gebauter Apparat, der Drehungen sehr verschiedener Schnelligkeit herzustellen gestattet".

Es ist dies das vielfach gebrauchte Instrument, das ich fortan als den **Pfefferschen** Klinostaten andeute. In seiner Form entspricht es ganz dem oben beschriebenen, durch Ankergang regulierten Exemplar.

Es wurde in zwei Grössen, mit stärkerer und mit schwächerer Triebfeder, angefertigt von E. Albrecht in Tübingen [2]. Das Besondere dieses Klinostaten besteht also in der Regulierung des Ganges durch Flügel. Die Flügel sind verstellbar auf ihren Achsen; sie können mehr oder weniger schief gestellt oder auch ganz entfernt werden. Noch durch zwei andere Mittel lässt die Schnelligkeit der Umdrehung sich ändern. Die Spiralfeder auf der Achse des Flügelregulators kann mehr oder weniger gespannt werden; und der Trieb des Regulators kann auf den grossen oder auf den kleinen Radkranz des Kronrades geschoben werden.

In dieser Weise lässt sich beim grossen Klinostaten jede Umlaufzeit zwischen 4 und 26 Minuten an der langsamen Achse, zwischen 36 und 140 Sekunden an der schnelleren Achse herstellen [3]. Wenn man den Regulator

---

1) W. Pfeffer, Handbuch der Pflanzenphysiologie, Bd. II. Leipzig, 1881, S. 305.

2) W. Pfeffer, Bezugsquelle und Preis einiger Apparate. Botanische Zeitung, Bd. 45, 1887, Sp. 27—28

3) Laut eines Preis-Verzeichnisses des Herrn Albrecht, ohne Jahreszahl.

ganz entfernt, wird mit der schnellsten Achse eine Umlaufzeit von ungefähr 1 Sekunde erreicht, wobei das Instrument alle 3 bis 5 Minuten neu aufgezogen werden muss. Sogar in dieser Weise konnte Fitting das Instrument bei einigen geotropischen Versuchen anwenden [1].

Die Vorteile der Flügelregulation sind mithin beim Pfefferschen Klinostaten benutzt worden, um die Umlaufzeit zwischen weiten Grenzen ändern zu können.

In der Beschreibung und Abbildung in der zweiten Auflage des Handbuches nennt Pfeffer zwei Formen seines Klinostaten, resp. mit 2 und 3 Triebzapfen [2]. Diese neuesten Formen gestatten jede Umlaufzeit zwischen 2 Minuten und 70 Minuten resp. 8 Stunden.

Die Umdrehungsachse ist beim Pfefferschen Klinostaten durch ein Kugelgelenk mit dem Triebzapfen verbunden und trägt eine besondere Zentrierungsvorrichtung. Das genannte Preisverzeichnis sagt davon:

„Die Äquilibrierung der Lasten geschieht in der Weise, dass zunächst das Universalgelenk auf der entsprechenden Achse des Klinostaten festgeklemmt wird. Im oberen Teil des Gelenkes ist die belastete Achse, welche mit ihrem anderen Ende auf den Friktionsrollen aufliegt, leicht drehbar; infolge dessen dreht sich das Uebergewicht der Last nach unten und nun wird der auf der Achse drehbar befestigte Stift nach oben gekehrt und die auf dem Stift verschiebbaren Gewichte so befestigt, bis das Gleichgewicht hergestellt ist, worauf die Achse im Universalgelenk festgeklemmt wird."

Die Prinzipien im Bau des Pfefferschen Klinostaten sind aus all dem erwähnten abzuleiten:

1) H. Fitting, Untersuchungen über den geotropischen Reizvorgang. Jahrbücher für wiss. Botanik, Bd. 41, 1905, S. 297.

2) W. Pfeffer, Handbuch der Pflanzenphysiologie, Bd. II, 2te Aufl., Leipzig, 1904, S. 571.

a. Die Triebkraft ist eine Feder und ist somit nicht ganz konstant.

b. Die Regulierung geschieht mittelst Flügel; sie ist mithin sehr abhängig von der Last und von einem geringen Übergewicht. Die Bewegung ist stossfrei.

c. Als Ersatz für die Empfindlichkeit der Flügelregulierung gegen ein Übergewicht ist eine besondere Zentrierungsvorrichtung angebracht.

Der Klinostat von H. Heele, angefertigt auf Bestellung von **S. Schwendener**[1]), ist in seinem Wesen nur ein Pfefferscher Klinostat in stärkeren Dimensionen. In einigen Unterteilen unterscheidet er sich durch bessere Konstruktion; so ist der Flügelregulator mit einer Schraube ohne Ende anstatt des Kronrades versehen. Später sind noch einige Verbesserungen vorgenommen, wie Schwendener erwähnt[2]). Es wird dort die Umlaufzeit auf 10 bis 60 Minuten angegeben, indem der Apparat nach einmaligem Aufziehen 36 bis 40 Stunden läuft.

Eine abweichende Form hat der **Wortmann**sche Klinostat erhalten[3]).

Hier ist das Uhrwerk nicht an den Deckel eines Kastens befestigt, sondern auf einem festen eisernen Fuss aufge-

1) H. Heele, Grosser Klinostat. Zeitschrift für Instrumentenkunde, Bd. 5, 1885, S. 122—124.

2) S. Schwendener und G. Krabbe, Über die Orientirungstorsionen der Blätter und Blüthen. Abhandlungen der kön. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1892, S. 70. Ebenfalls abgedruckt in S. Schwendener, Gesammelte botanische Mittheilungen, Bd. 2, 1898, S. 326.

3) J. Wortmann, Ein neuer Klinostat. Berichte der deutschen botanischen Gesellschaft, Bd. 4, 1886, S. 245—248, mit Tafel XIII.

schraubt. Die schiefen Stellungen der Umdrehungsachse werden nur durch ein Kugelgelenk ermöglicht. Die vertikale Stellung wird von einer leicht anzubringenden Achse besorgt, welche mittelst zweier konischen Räder mit dem Triebzapfen verbunden wird.

Das Instrument hat drei Triebzapfen, welche übereinander gestellt sind und ohne Belastung einen Umlauf in resp. 10, 15 und 20 Minuten vollenden, wenigstens bei den Exemplaren, deren Windfang nicht verstellbar ist. Es sind jedoch auch Exemplare verfertigt mit Flügeln, welche ein wenig verstellt werden können. Ein besonderer Vorteil des Instrumentes ist die Vorrichtung um durch Ausziehen eines Stiftes die Kommunikation der drei Triebachsen mit dem Uhrwerk zu unterbrechen. Es ist dadurch eine relativ gute Zentrierung mittelst des oben beschriebenen Zentrierungsstiftes möglich. Die Reibung der Achsen in ihren Lagern ist ja geringer als die Reibung der Umdrehungsachse in dem Kugelgelenk, welche letztere beim Zentrieren des Pfefferschen Klinostaten überwunden werden muss.

Die Handhabung des Instrumentes ist eine sehr bequeme. Die Tragfähigkeit ist geringer als beim Pfefferschen Klinostaten. Wortmann sagt davon: „Bei der angestellten Prüfung fand bei horizontaler Drehungsaxe bei einer Belastung von 2 kg noch ganz regelmässige und ruhige Bewegung statt. Allerdings bei einer Verlangsamung von 1 Minute pro Umdrehung. Bei verticaler Axe aber konnte eine Belastung von 5 kg angewendet werden, ohne dass eine Verlangsamung der Umdrehung eintrat" [1]).

Die ausführliche Beschreibung und Abbildung des Wortmannschen Klinostaten ist auch von Detmer in seinem Praktikum abgedruckt worden [2]).

---

1) l. c. S. 248.

2) W. Detmer, Das Pflanzenphysiologische Praktikum, 2te Aufl., Jena, 1895, S. 378—380.

Im Handel sind kräftige Triebwerke zu erhalten, welche zum Drehen einer Last in Schaufenstern bestimmt sind. Sie werden durch Flügel reguliert, doch sie drehen für den Gebrauch als Klinostaten zu schnell.

Pfeffer giebt in seinem Handbuch an, dass hieraus durch Veränderung der Flügelregulation oder durch die Einschaltung einer Ankerregulation ein Klinostat zu konstruieren sei [1]).

J. Wiesner demonstrierte im November 1901 „einen über seinen Auftrag von L. Castagna construierten Klinostat, der durch Anbringung eines Kugellagers trotz seiner geringen Grösse im Stande ist, ein Gewicht von mehr als 30 kg. zu rotieren" [2]). Das Instrument ist etwas näher beschrieben worden von K. Linsbauer [3]), der jedoch nicht über die Regulierung des gewöhnlichen hierin verwendeten Uhrwerkes berichtet. Der Apparat gestattet nur eine Rotation um die vertikale Achse und vermag laut dieser Angabe 70 bis 100 kg völlig gleichmässig zu rotieren.

In späteren Jahren wurde immer mehr das Bedürfnis empfunden, grössere und zahlreichere Pflanzen zugleich rotieren zu können. Die Federklinostaten boten dazu keine Gelegenheit, denn auch der letztgenannte Klinostat von Wiesner ist dazu bei geneigter oder horizontaler Achsenlage nicht im stande.

Eben in dieser Zeit haben sich verschiedene Arten von Motoren mehr als früher zu mehreren Zwecken in den Laboratorien eingebürgert. So nimmt es kein Wunder, dass einige kräftigen Klinostaten erbaut worden sind, welche mit Hülfe solcher Motoren getrieben wurden. Im

1) l. c. Bd. II, 2te Aufl., 1904, S. 571, Anmerkung 3.
2) Österreichische Botanische Zeitschrift, Bd. 52, 1902, S. 85.
3) K. Linsbauer, Deutsche Mechaniker-Zeitung, 1904, S. 33.

hiesigen botanischen Institut ist ein solcher Klinostat mit Elektromotor vorhanden. Über die Gleichmässigkeit seiner Rotation wird in dieser Untersuchung ausführlich berichtet werden. Hierum, und weil das Instrument noch nicht beschrieben wurde, werde ich seine ausführliche Beschreibung derjenigen der übrigen Motorklinostaten voranschicken.

Der Klinostat wurde nach den Angaben von Prof. **J. W. Moll** im Jahre 1898 angefertigt von der elektrotechnischen Firma H. Doyer und der Maschinenfabrik „Reineveld," Direktor Herr J. G. F. Rooker, beide damals in Delft.

Er ist in vertikaler und in horizontaler Stellung abgebildet auf Tafel III.

Tafel IV zeigt ihn in einer solchen vertikalen Stellung, dass die Räder des Gehwerkes deutlich hervortreten.

Tafel V stellt 4 Ansichten des Instrumentes dar auf $^1/_{10}$ der natürlichen Grösse. Figur A ist die Obenansicht nach Entfernung der grossen Scheibe. Figur B ist die Seitenansicht an der Seite der Riemenscheibe; der Motor ist weggelassen. Figur C ist die Vorderansicht. Figur D ist die Obenansicht der grossen gusseisernen Scheibe, auf welche die zu rotierenden Pflanzen befestigt werden.

In den 4 Figuren sind die nämlichen Unterteile mit denselben Ziffern angedeutet. Die in der folgenden Beschreibung genannten Ziffern beziehen sich auf diese Tafel V. Alle Längenmaasse sind den Figuren zu entnehmen durch Multiplikation mit 10.

Der schwere gusseiserne Fuss 1 ist behufs der Riemenspannung mit zwei Führungsschlitten 2 versehen, in welchen der Elektromotor 3 verschiebbar festgeschraubt ist.

Am hinteren Ende des Fusses ist der Anlassrheostat 4 befestigt.

Der Riemen 5 verbindet den Motor mit der Riemenscheibe 6, welche auf die untere Achse 7 befestigt ist. Auf dieser Achse ist die zylindrische eiserne Friktionsrolle 8 festgekeilt die gegen die Friktionsscheibe 9 drückt.

Diese Scheibe ist von Eisen und mit ein Friktionsband von Gummi umgeben. Die Friktionsscheibe sitzt auf der Achse 10, welche wir die erste Wurmachse nennen werden. Der erste Wurm hat ein einfaches Gewinde und greift in das Zahnrad 11, das an der zweiten Wurmachse 12 befestigt ist. Der zweite Wurm hat ebenfalls ein einfaches Gewinde und greift in das Zahnrad 13. Das Zahnrad 13 ist fest verbunden mit dem konischen Zahnrade 14; sie drehen frei um die feste Achse 15, welche durch die Schraube 16 im Fussstück festgehalten wird. Das konische Rad 14 greift in den Zähnen des konischen Rades 17, welches in einem Stück mit der Umdrehungsachse 18 gegossen ist. Die Scheibe 19 ist mit der Achse 18 verbunden durch drei Schrauben 20. Sei ist mit vielen radialen Schlitzen 21 versehen, worin die Stäbe u. s. w. befestigt werden, welche die Pflanzen tragen sollen.

Der Elektromotor 8 ist ein Nebenschlussmotor von einer Pferdestärke und ist berechnet für 230 Volt. Doch beträgt die Spannung der Laboratoriumsleitung nur 113 Volt, so dass der Motor Wochen lang ohne Pause laufen kann, ohne sich je zu erhitzen. Seine Tourenzahl ist 850 pro Minute. Die Riementransmission vermindert diese Zahl 5 Mal, also bis auf 170 pro Minute.

Die Friktionsscheibe 9 an der ersten Wurmachse 10 dreht 5 Mal so langsam, also 34 Mal pro Minute.

Das Zahnrad 11 hat 40 Zähne; dadurch dreht die zweite Wurmachse (12) 40 Mal so langsam, also 1 Mal in $1^3/_{17}$ Minute.

Das Zahnrad 13 hat ebenfalls 40 Zähne; dadurch dreht das konische Rad 14 wiederum 40 Mal so langsam, also 1 Mal in 47 Minuten.

Die konischen Räder 14 und 17 haben resp. 40 und 20 Zähne. Die Umdrehungsachse 18 macht somit einen Umlauf in ungefähr $23^1/_2$ Minuten. Es ist dies die langsamste Umlaufzeit; allein wenn der Anlassrheostat eingeschaltet bleibt, verringert sich die Schnelligkeit noch bis auf un-

gefähr 35 Minuten wegen der dann kleineren Tourenzahl des Motors.

Durch die folgenden leicht auszuführenden Manipulationen ist die Schnelligkeit der Umdrehung zu vergrössern.

Erstens kann anstatt der Riemenscheibe 6 eine Riemenscheibe von 5 Mal kleinerem Durchmesser auf die untere Achse 7 befestigt werden.

Der Motor kann in den Schlitten nicht so weit zurück geschoben werden, dass dann derselbe Riemen noch gebraucht werden kann, weshalb für diesen Fall ein kürzerer Riemen beigegeben ist. Die Umlaufzeit beträgt so ungefähr 4¾ Minuten, und mit eingeschaltetem Anlassrheostat 6 Minuten.

Das kleine Riemenscheibchen ist in der Ecke des Zinktellers unter dem Klinostaten auf Tafel III und IV zu sehen.

Zweitens kann die Riemenscheibe 6, anstatt an der unteren Achse 7, an der ersten Wurmachse 10 befestigt werden. Es muss die Friktionsrolle 8 dann nach links in der Richtung der Keilnute 22 verschoben werden, damit die Friktionsscheibe 9 sich frei drehen kann. Die Verlangsamung durch Friktionsrolle und Friktionsscheibe ist jetzt ausgeschaltet, wodurch die Umlaufzeit ebenfalls 4¾ Minuten beträgt. Wenn der Anlassrheostat eingeschaltet bleibt, wird diese Zeit 6 Minuten. Es dreht sich die erste Wurmachse 10 — und dadurch auch die Umdrehungsachse mit Scheibe — jetzt in der entgegengesetzten Richtung als vorher.

Drittens kann die kleine Riemenscheibe an der ersten Wurmachse 10 befestigt werden. Die Umlaufzeit ist dann noch 5 Mal so gering, also ungefähr 1 Minute.

Andere gewünschten Umlaufzeiten sind selbstverständlich durch Riemenscheiben von anderem Durchmesser zu erhalten.

Die Umdrehungsachse 18 kann in jeder Richtung zwi-

schen der vertikalen und der horizontalen gestellt werden, indem ihr Lager 23 mit dem Lagerstück 24 um die feste Achse 15 gedreht wird. Das Stück 24 wird dann wieder durch die Schraube 25 auf die Achse 15 festgeklemmt. Der Eingriff der konischen Räder 14 und 17 ermöglicht die genannte Verstellung, indem das Rad 14 dieselbe Achse 15 hat wie das Stück 24.

Die Scheibe 19 hat das ansehnliche Gewicht von 39 kg. Sie wird darum einigermassen kontrebalanciert durch das eiserne Gewicht 26 von 19½ kg, das an dem Stab 27 verschiebbar ist und mit der Schraube 28 befestigt wird.

In der horizontalen Stellung wird der drehbare Oberteil gestützt durch das Stück 29, das sich gegen den festen Arm 30 anlehnt.

Die Lager der unteren Achse 7 und der ersten Wurmachse 10 sind mit Schmiergefässen versehen.

Nicht alle die genannten Umlaufzeiten lassen sich gleich gut anwenden. Zumal die schnellste, von 1 Minute, giebt dann und wann eine nicht stossfreie Bewegung.

Doch wird man wohl selten eine so schnelle Rotierung bedürfen. Schlimmer war es, dass bei horizontaler Achse im Anfang auch die langsame Bewegung nicht stossfrei war. Die Ursache lag in Reibungen im Eingriff der beiden konischen Räder 14 und 17. Diese Räder sind gegossen, weil geschnittene Räder den Preis des Instrumentes zu sehr erhöht hätten. Und die Umdrehungsachse 18 hat keine ganz fixe Lage, indem er nicht zwischen Lagern eingeschlossen ist behufs der Ermöglichung einer geneigten bis horizontalen Stellung.

Bei vertikaler Stellung verursacht das Gewicht von Scheibe und Last, dass die Zähne immer im tiefsten Eingriff stehen. Bei horizontaler Stellung änderte sich jedoch der Eingriff stetig, was die Bewegung unregelmässig machte. Aus diesem Grund ist eine Art Bremsscheibe 31 angebracht worden, welche durch 3 Schrauben 32 an dem Lager 23

befestigt ist und gegen den Kragen 33 der Umdrehungsachse 18 drückt. Diese Bremse hält die Achse mit dem Rad 17 in derselben Stellung, ohne jedoch die Bewegung beträchtlich zu verlangsamen. Im zweiten Kapitel wird gezeigt werden, dass in der vertikalen Stellung die Bremse besser zu entfernen sei. Sie ist von Bronze und steht mit ihren drei Schrauben auf dem Zinkteller in der Figur der vertikalen Stellung auf Tafel III.

Einige Beschwerden verursacht das Gummiband der Friktionsscheibe 9. Das Instrument wird in allen Lagern reichlich mit Öl, an den Zähnen mit Konsistenzfett versehen. Das Gummiband ist ungeachtet des angebrachten Blechschirmes doch schwierig frei vom Öl zu halten, was seine Lebensdauer beeinträchtigt. Des Öles wegen ist der Zinkteller unter dem Instrumente gestellt: ein mit Zink bekleidetes Holzbrett, das in den photographischen Aufnahmen der Tafeln III und IV zu sehen ist.

Der beschriebene Klinostat hat sich gut bewährt bei längerem Gebrauch. Er ist im stande, fast unbegrenzt schwere Lasten zu rotieren. Sein grosses Gewicht — ohne den Elektromotor ungefähr 200 kg — macht das Verschleppen zwar nicht leicht, doch ist er in mehreren Arbeitszimmern gebraucht worden. Sein Stromverbrauch ist nicht zu gross, 1 bis 1¼ Ampere. Sein Preis war 750 Mark ohne den Elektromotor, der 465 Mark kostete. Es wird sich dieser Preis jedoch erhöhen, wenn einige erwünschten Verbesserungen vorgenommen werden: Ersetzung der Friktionsscheibe und Rolle durch geschnittene Zahnräder, Benutzung von geschnittenen konischen Rädern, und bessere Lagerung der Umdrehungsachse. Dagegen wäre durch etwas leichteren Bau einige Ersparnis möglich.

Die Prinzipien, welche beim Bau der Motorklinostaten Verwendung finden, sind folgende:

a. Die Triebkraft ist ein Motor von grosser

Kraft, welche im allgemeinen nicht genau konstant sein wird.

b. Die Regulierung wird von der Belastung und von dem Motor selbst bedingt; sie ist mithin ziemlich abhängig von der Last und von einem Übergewicht.

Die Bewegung erfolgt ohne regelmässige Stösse; unregelmässig verteilte Stösse können vorkommen bei zu grosser Reibung im Gehwerk.

c. Genaue Zentrierung der Last ist schwierig, doch auch weniger nötig als bei den Federklinostaten.

Ausser dem Mollschen erwähne ich jetzt noch 3 Motorklinostaten.

Im Jahre 1896 konstruierte **R. Goldschmidt** einen grossen Motorklinostat für das botanische Institut in Brüssel. Er beschrieb die inmittels noch verbesserte Konstruktion des Instrumentes im Jahre 1905 [1]), welche Beschreibung mir nicht zu Gebote stand.

Dieser Klinostat wurde von J. Massart 32 Monate lang mit horizontaler Achse in einem warmen und feuchten Gewächshaus gebraucht, oft Wochen lang mit einer Last von mehr als 60 kg [2]). Neben einer Beschreibung und Zeichnung giebt Massart auch stereoskopische Abbildungen des Klinostaten im Gewächshaus mittelst photographischer Aufnahmen in roter und blauer Farbe.

---

1) Bulletin de la société royale des sciences médicales et naturelles de Bruxelles, Février 1905. Zitiert nach J. Massart, Notes de Technique (siehe unten).

2) J. Massart, Notes de Technique. Annales de la société royale des sciences médicales et naturelles de Bruxelles, Tome XIV, fasc. 2, 1905, S. 5 u. f. des Separatabdrucks.

Der Motor ist ein Heissluftmotor, der getrieben wird von einer Petroleumlampe. Durch zwei Riementransmissionen und eine Zahnradübersetzung wird eine horizontale Wurmachse rotiert, welche die Umdrehungsachse in Bewegung setzt.

Die Umdrehungsachse mit Scheibe und Schneckenrad ist um die Wurmachse verstellbar von der vertikalen bis zur horizontalen Lage. Die grosse Scheibe ist von perforiertem Stahlblech verfertigt. Die Umlaufzeit lässt sich ändern durch verschiedene Riemenscheiben und verschiedene Schnelligkeiten des Heissluftmotors. Der Preis ist ohne den Motor 290 Mark. Mit geringeren Mitteln ist bei diesem Klinostaten wohl beinahe dasselbe erreicht wie beim Mollschen.

Seit 1897 benutzte **F. C. Newcombe** einen Motorklinostaten, den er in 1904 beschrieb und abbildete [1].

Der Motor und die Übersetzungen haben hier jede ihren gesonderten Fuss und sind nur durch die Transmissionsriemen verbunden. Newcombe gebrauchte einen Wassermotor oder einen Elektromotor. Beide hatten ¼ Pferdestärke und machten 1600 Touren pro Minute. Der Motorriemen bewegte ein Schneckenvorgelege mit 100 oder mit 200 Zähnen und einfachem Gewinde. Ausserdem war die Riemenscheibe des Vorgeleges 4 Mal so gross als die des Motors.

Die Umlaufzeit wurde hierdurch schon bis auf ¼ oder ½ Minute gesteigert. Durch weitere Achsen mit Stufenscheiben und Riemen konnte die Umlaufzeit bis auf die gewünschte Grösse verlängert werden. Für geneigte oder horizontale Lage dient eine besondere Achse, welche mit

1) F. C. Newcombe, Klinostats and Centrifuges for physiological Research. Botanical Gazette, Vol. 38, 1904, S. 427, u. f.

ihrer Mitte in einem Lager eines drehbaren Stativs ruht, zwischen der Riemenscheibe und der Scheibe zur Befestigung der Pflanzen.

Der Preis ist ohne den Motor ungefähr 110 Mark, mit dem Elektromotor ungefähr 255 Mark.

Das Instrument ist zugleich als Zentrifugalapparat anzuwenden. Er ist nicht für so grosse Lasten berechnet, als von den beiden vorigen Klinostaten rotiert werden können; und die Konstruktion ist mit sehr einfachen Mitteln vorgenommen. Doch ist die ganze Vorrichtung sehr praktisch und bequem in der Handhabung.

Schliesslich wurde auf Anregung **J. Wiesners** in 1903 ein Klinostat für elektrischen Betrieb konstruiert vom Mechaniker L. Castagna. K. Linsbauer nahm an der Konstruktion desselben gleichfalls Anteil und veröffentlichte die Beschreibung und Abbildung des Instrumentes [1]). Wie beim Newcombeschen Klinostaten ist auch hier der Motor, die Übersetzung und der eigentliche Klinostat gesondert aufgestellt, nur durch die Transmissionsriemen verbunden. Der Elektromotor hat ¼ Pferdestärke. Die Übersetzung besteht aus einem Schneckenvorgelege (einfaches Gewinde und 200 Zähne) und zwei Zahnradvorgelegen, wodurch die entfernteste Achse eine Umdrehung pro Stunde macht, wenn die Tourenzahl des Motors 600 pro Minute beträgt. Die 3 Vorgelege sind zu einem Instrumente vereinigt, dessen letzte Achse verlängert ist und schon als Klinostatenachse verwendet werden kann.

Der eigentliche Klinostat wird mit dieser Achse durch Riementransmission verbunden und besteht aus einer Achse, welche horizontal oder vertikal in einem gusseiser-

---

1). K. Linsbauer, Universalklinostat mit elektrischem Betrieb nach Prof. J. Wiesner. Deutsche Mechaniker-Zeitung, 1904, S. 33—36 (Beiblatt zur Zeitschrift für Instrumentenkunde, Bd. 24, 1904).

nen Stativ befestigt werden kann. Geneigte Lagen sind mit Hülfe eines Kugelgelenkes zu erhalten.

Durch Einschaltung von Stufenscheiben können beliebige Umlaufzeiten hergestellt werden. Auch können mehrere Klinostaten zugleich in Drehung versetzt werden. Der Apparat kann wie der Newcombesche auch für Zentrifugalversuche dienen. Der Preis von Motor, Übersetzung und 3 Klinostaten ist 850 Mark. Die Ausführung ist dementsprechend eine bessere als beim Newcombeschen Klinostaten. Er rotiert ansehnliche Lasten, sei es nicht so schwere als die Klinostaten von Moll und Goldschmidt.

KAPITEL II.

Die Ungleichmässigkeit in der Rotation der Klinostaten.

Im vorigen Kapitel wurde eine Übersicht über die Konstruktionsformen der Klinostaten gegeben. Der Begriffsbestimmung des Klinostaten gemäss muss seine Rotation eine gleichmässige sein. Im vorliegenden Kapitel habe ich untersucht, inwiefern sie dieser Forderung entsprechen.

Dutrochet entdeckte schon in 1824, dass eine Ungleichmässigkeit in der Rotation, welche von einem Übergewicht der Belastung verursacht wird, den Zweck des Klinostaten verfehlt macht [1] Es ist daher auf die genaue Zentrierung der Last ein grosses Gewicht zu legen.

Sachs sagte davon [2]: „..... läge der Schwerpunkt der zu drehenden Last ausserhalb der Axe, so würde die Drehung auf der Seite, welche das grössere Drehungsmoment besitzt, bei dem Aufsteigen langsamer als bei dem Absteigen erfolgen; die sich drehenden Pflanzen würden also der Erde die eine Seite länger als die andere zukehren und so nach längerer Zeit geotropische Kümmungen zeigen."

Die späteren Forscher haben alle die Notwendigkeit einer gleichmässigen Rotierung erkannt. So sagt Fitting an einer Stelle seiner Untersuchung über den geotropischen

1) H. Dutrochet, l. c. 1824, S. 147—148. Dasselbe in H. Dutrochet, l. c. 1837, S. 45—46.

2) J. Sachs, Ueber das Wachsthum der Haupt- und Nebenwurzeln, l. c. 1874, S. 597.

Reizvorgang [1]: „Ich möchte hervorheben, dass diese und die noch weiterhin mitzuteilenden Versuche mit zwei Klinostaten ausgeführt wurden, bei denen durch Vorversuche eine absolut gleichmässige Rotation sichergestellt worden war."

Wie ich in der Einleitung erwähnte, konnte ich von den von mir benutzten Instrumenten nicht dasselbe sagen. Doch gehörten sie zu den meist gebräuchlichen Typen der Klinostaten.

Ich werde nun erst ausführlich berichten über die Untersuchung dieser Instrumente bei horizontaler Achse. Nachher wird kürzlich das Benehmen bei vertikaler Achse besprochen. Endlich werde ich angeben, inwiefern die erhaltenen Schlüsse für die im ersten Kapitel erwähnten Klinostatentypen gelten können.

Eine genauere Untersuchung betreffs der Gleichmässigkeit der Rotation bei horizontaler Achse wurde bei folgenden Federklinostaten angestellt:

a. Der **Wortmanns**che Klinostat. Von diesen untersuchte ich zwei Exemplare.

Erstens ein gewöhnliches Exemplar des Wortmannschen Klinostaten, angefertigt von der technischen Anstalt von Gebrüder Ungerer in Strassburg und Eigentum des botanischen Institutes in Leiden.

Zweitens ein schwereres Modell des Wortmannschen Klinostaten, für das hiesige botanische Institut angefertigt in der Werkstatt von P. J. Kipp und Söhne, J. W. Giltay Nachfolger in Delft. Es wurde ziemlich genau nach dem Originale kopiert, nur sind alle Teile etwas schwerer und hat zumal die Triebfeder eine grössere Kapazität. Indem das originelle Exemplar im Leidenschen botanischen

1) H. Fitting, Unters. üb. den geotr. Reizvorgang. Jahrb. für wiss. Botanik, Bd. 41, 1905, S. 252.

Institute nach einmaligem Aufziehen ungefähr 20 Stunden geht, stellt das schwerere Exemplar unbelastet seinen Lauf erst nach 70 Stunden, mit $1^{1}/_{2}$ kg belastet nach 75 Stunden ein.

b. Ein gewöhnliches Exemplar des **Pfeffer**schen Klinostaten, grosses Modell, angefertigt in der Werkstatt von E. Albrecht in Tübingen und Eigentum des botanischen Institutes in Utrecht.

Der Wortmannsche Klinostat wurde in erster Linie untersucht. Bei den Versuchen mit horizontaler Achse befestigte ich das Gelenk der Umdrehungsachse an die obere, schnellst drehende der drei Triebzapfen. Die Achse war einerseits in das Gelenk befestigt, andrerseits ruhte sie auf dem Stativ mit den Friktionsrollen. Dem äusseren Ansehen nach war die Rotation ganz gleichmässig. Wenn sie nicht gleichmässig war, könnte dies von den folgenden Ursachen herrühren:

1. Die Feder spannt sich nicht gleichmässig ab, wodurch die Rotation etwas verlangsamt und dann plötzlich wieder beschleunigt wird.

2. Das Gelenk hat einigen Spielraum, wodurch die Achse sich während jeder Rotation zwei Mal etwas verstellt.

3. Das Gelenk ist nicht gerade axial, wodurch die Achse etwas hin und her schwankt.

4. Es giebt einigen Spielraum im Eingriff der Zähne des Gehwerkes, wodurch bei nicht zentrierter Last die Achse in jeder Rotation abwechselnd dem Gehwerk vorangeht und vom Gehwerk geschoben wird, resp. wenn der Schwerpunkt fällt oder steigt.

5. Die Flügelregulation des Gehwerkes ist nicht im stande, ein etwaiges Übergewicht der Last ganz zu kompensieren, wodurch die Achse schneller dreht wenn der Schwerpunkt fällt als wenn er steigt.

Die erstgenannte Ursache ist allerdings anwesend, wie später bewiesen werden soll. Sie beeinträchtigt jedoch den Wert des Instrumentes sehr wenig, denn die unregelmäs-

sige Abspannung der Feder verursacht keinen periodischen Fehler. Die plötzlichen Beschleunigungen treten in ganz unregelmässigen Zeitpunkten auf.

Die zweite und dritte Ursache können durch genaue Stellung des Gelenkes vermieden werden, und jedenfalls kann man ihre Wirkung bis auf ein Minimum zurückführen.

Die vierte und fünfte Ursache sind bei dem Wortmannschen Klinostaten nicht zu vermeiden. Insbesondere durch die fünfte Ursache kann die periodische Ungleichmässigkeit der Rotation bis zu einem sehr ansehnlichen Betrage bestehen bleiben. Die zu beschreibenden Versuche werden zeigen, dass diese Ungleichmässigkeit von der exzentrischen Belastung herrührt. Ausserdem wird gezeigt werden, dass die Zentrierungsvorrichtung nicht im stande ist den Schwerpunkt genügend in die Achsenlinie zu stellen. Wenn der Schwerpunkt um einen durch diese Vorrichtung nicht sichtbar zu machenden Betrag von der zentralen Stellung abweicht, ist noch eine ansehnliche periodische Ungleichmässigkeit in der Rotation anwesend. Im dritten Kapitel wird gezeigt, dass diese Ungleichmässigkeit genügt um geotropische Krümmungen in Wurzeln zu verursachen und somit den Zweck des Klinostaten fehlschlagen zu lassen.

Die ersten Versuche, welche die periodische Ungleichmässigkeit der Rotation zeigten, wurden mit dem schweren Modell des Wortmannschen Klinostaten in einer sehr einfachen Weise angestellt.

An dem ausserhalb der Friktionsrollen hervorragenden Achsenende war ein aus perforiertem Zinkblech gearbeitetes Kistchen mittelst einer Klemmschraube befestigt. Das Kistchen war mit feuchten Sägespänen gefüllt, gerade wie bei den geotropischen Versuchen, wenn sich Keimlinge in den Sägespänen befanden. Das Kistchen mit Deckel und Sägespänen hatte ein Gewicht von fast 1,8 kg. Dieses Gewicht dürfte nicht zu gross geachtet werden,

weil Wortmann laut seiner Beschreibung des originellen — leichter gebauten — Instrumentes [1]) bei einer Belastung der horizontalen Achse von 2 kg noch ganz regelmässige und ruhige Bewegung fand.

Der Schwerpunkt wurde mittelst der Zentrierungsvorrichtung so genau wie möglich in die Achsenlinie gestellt. Weil dies bei jedem Versuche geschah, wo nicht der Gegenteil erwähnt wird, werde ich künftig das selbstverständliche Zentrieren nicht immer mehr erwähnen.

Das Uhrwerk war nicht lange bevor aufgezogen worden.

In einer Entfernung von etwas mehr als 2 Meter vor dem rotierenden Klinostaten setzte ich mich mit der Taschenuhr in der Hand. Wenn ich die Seiten des Zinkblechkistchens parallel mit den Seiten des Klinostatengehäuses sah, wurde sogleich die Stellung des Sekundenzeigers notiert. So erhielt ich vier Zeiträume in jeder Umdrehung, während welcher jedesmal eine Viertelumdrehung zurückgelegt war. Diese Viertel wurden nicht in derselben Zeit zurückgelegt: die Zeiträume schwankten unregelmässig, und zeigten ausserdem im Durchschnitt eine periodische Ungleichmässigkeit. Folgendes Beispiel wird dies erläutern.

30 Dezember 1904. Wortmannscher Klinostat, schweres Modell.

Umdrehung.	1	2	3	4	im Durchschnitt.	
1ter Quadrant	195	190	185	187	189¼	378¾ Sek. pro Hälfte.
2ter „	185	190	195	188	189½	
3ter „	200	200	195	200	198¾	410 „ „ „
4ter „	200	215	215	215	211¼	

Summe der beiden Hälften 788¾ Sek.
Unterschied „ „ „ 31¼ „

1) J. Wortmann, l. c d. 248.

Die erste Hälfte der Umdrehung wurde im Durchschnitt zurückgelegt in 378¾ Sek., die zweite Hälfte in 410 Sek., was bei einer Umlaufzeit von ungefähr 13 Minuten einem Unterschiede von einer halben Minute entspricht.

Dieselbe Methode wurde angewendet, indem die Achse fast unbelastet blieb; es wurde nur ein langer rechteckiger Kartonstreifen auf die Achse befestigt, um die Stellung der Achse mit den Seiten des Klinostatengehäuses vergleichen zu können. Die Rotation erwies sich jetzt als viel gleichmässiger; es war nur eine zweifelhafte periodische Ungleichmässigkeit übrig geblieben.

Diese Methode war jedoch nicht geeignet um geringere Ungleichmässigkeiten in der Rotation aufzufinden. Ausserdem war es sehr ermüdend, an fast demselben Zeitpunkte die Klinostatenachse und den Sekundenzeiger der Taschenuhr ins Auge zu fassen.

Ich befestigte jetzt eine runde Kupferscheibe von 13 cm Durchmesser und 230 g Gewicht auf die Umdrehungsachse. Mit Hülfe der Teilscheibe waren auf der Drehbank acht radiale Furchen in dieser Scheibe eingeritzt in Entfernungen von je 45°. In diesen Furchen waren acht stählerne Nähnadeln festgelötet, welche mit der Spitze 1½ cm ausserhalb der Scheibe hervorragten. Unter der Scheibe, wo die Nadeln beim Rotieren der Klinostatenachse passierten, wurde ein dünnes gebogenes federndes Kupferdrähtchen horizontal befestigt. Die Nadeln berührten erst die konvexe Seite des Drahtes nahe am Gipfelpunkt, drängten es dann etwas bei Seite, bis das Drähtchen wieder frei kam und zurückschnellte. Durch diese Aufstellung des dünnen Drähtchens wurde die Umdrehung der Klinostatenachse sehr wenig von den acht Berührungen in jeder Rotation beeinflusst.

Der Strom eines Elementes wurde nun durch das Gehwerk und die Umdrehungsachse des Klinostaten, durch die Scheibe mit den acht Nadeln, durch das federnde Kupferdrähtchen, durch eine elektrische Klingel, nach dem Elemente

zurückgeleiteit. Acht Mal in jeder Rotation wurde der Strom geschlossen und erklang der Laut des Klingels.

Sobald das Klingeln ertönte, wurde die Stellung des grossen Sekundenzeigers einer Uhr notiert. Diese Uhr war aus einer Weckeruhr angefertigt worden um einen grossen Sekundenzeiger mit deutlichem Sekundenzifferblatt bei photographischen Aufnahmen im hiesigen Laboratorium anwenden zu können. Der Sekundenzeiger konnte im erwarteten Zeitpunkt stetig ins Auge gefasst werden, indem die Stellung der Klinostatenachse sich bald darauf durch das Klingeln kund gab.

Diese Methode erlaubte mir, mit grösserer Genauigkeit und weniger Anstrengung die Rotierung des Klinostaten kennen zu lernen. Es zeigte sich von neuem, dass bei belasteter Achse die Ungleichmässigkeit der Umdrehung grösser war als bei unbelasteter, wofür diese zwei Beispiele als Beleg dienen sollen.

2 Januar 1905. Wortmannscher Klinostat, schweres Modell.

Achse nur mit der Kupferscheibe mit den 8 Nadeln belastet.

Umdrehung.	1	2	3	im Durchschnitt.	
1ter Oktant.	91	91	90	$90\frac{2}{3}$	
2ter "	90	88	88	$88\frac{2}{3}$	
3ter "	90	88	89	89	
4ter "	88	87	87	$87\frac{1}{3}$	355 Sek. pro Hälfte.
5ter "	91	90	91	$90\frac{2}{3}$	
6ter "	88	87	89	88	
7ter "	90	91	91	$90\frac{2}{3}$	
8ter "	90	90	89	$89\frac{2}{3}$	$359\frac{2}{3}$ " " "

Summe der beiden Hälften $714\frac{2}{3}$ Sek.
Unterschied " " " $4\frac{2}{3}$ "

Hier ist nur eine geringe periodische Ungleichmässigkeit zu erkennen.

5 Januar 1905. Wortmannscher Klinostat, schweres Modell.

Achse ausserdem belastet mit einem hölzernen Kistchen mit Sägespänen und *Vicia*-Keimlingen von 600 g Gewicht, befestigt in dem Topfhalter von 470 g Gewicht.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	im Durchschnitt.	
1ter Oktant	99	97	100	99	97	$98\frac{2}{5}$	
2ter „	96	95	95	97	96	$95\frac{4}{5}$	
3ter „	92	92	91	93	94	$92\frac{2}{5}$	$379\frac{2}{5}$ Sek. pro Hälfte.
4ter „	95	96	93	92	93	$93\frac{4}{5}$	
5ter „	97	96	98	98	98	$97\frac{3}{5}$	
6ter „	97	99	101	97	98	$98\frac{2}{5}$	
7ter „	97	98	99	97	98	$97\frac{4}{5}$	$392\frac{4}{5}$ „ „ „
8ter „	97	99	99	97	99	$98\frac{1}{5}$	

Summe der beiden Hälften $772\frac{1}{5}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $13\frac{2}{5}$ „

Hier ist eine deutliche periodische Ungleichmässigkeit zu erkennen.

Zweiter bis fünfter Oktant werden im Durchschnitt in $379\,{}^{2}/_{5}$ Sek., sechster bis erster Oktant in $392\,{}^{4}/_{5}$ Sek. zuruckgelegt, was einen Unterschied von $13\,{}^{2}/_{5}$ Sek. für die beiden Hälften der Rotation ergiebt. Diese Ungleichmässigkeit ist in jeder der fünf kontrollierten Umdrehungen zu erkennen, und die *Vicia*-Keimlinge hatten nach 24 Stunden deutlich auf ihren Einfluss reagiert, wie später beschrieben werden soll.

Es ergab sich alsbald, dass man nicht zu bald, nachdem ein Versuch angefangen hat, mit dem Ablesen der Rotationszeiten anfangen soll. Wenn man die Umdrehungsachse in das Gehwerk eingeschaltet hat, braucht die Feder des Klinostaten einige Zeit um ihre volle Spannung gegen die zu drehende Last zu erreichen. Die Rotationsgeschwindigkeit nimmt dadurch im Anfang stetig zu, bis sie ihre normale Höhe erreicht hat. Folgendes

Beispiel einer Ablesung im Anfang eines Versuches wird dies erläutern.

4 Januar 1905. Wortmannscher Klinostat, schweres Modell. Achse mit dem Zinkblechkistchen mit feuchten Sägespänen und *Vicia*-Keimlingen belastet.

Umdrehung.	1	2	3	im Durchschnitt.	
1ter Oktant.	133	113	108	118	
2ter "	134	113	107	118	
3ter "	135	116	111	$120\frac{2}{3}$	
4ter "	140	125	116	127	
5ter "	147	136	133	$138\frac{2}{3}$	515 Sek. pro Hälfte.
6ter "	136	129	121	$128\frac{2}{3}$	
7ter "	118	112	109	113	
8ter "	115	109	104	$109\frac{1}{3}$	$458\frac{1}{3}$ " " "

Summe der beiden Hälften $973\frac{1}{3}$ Sek.
Unterschied " " " $56\frac{2}{3}$ "

In den aufeinander folgenden Umdrehungen des nämlichen Oktantes nimmt die Sekundenzahl stetig ab; die Rotation wird also immer geschwinder. Ungeachtet dieses Umstandes ist die periodische Ungleichmässigkeit in jeder Rotation sowohl wie im Durchschnitt ganz deutlich. Dritter bis sechster Oktant brauchen im Durchschnitt zusammen 515 Sek., siebenter bis zweiter Oktant $458^1/_3$ Sek. Wenn die normale Geschwindigkeit erreicht ist, wird dieser Unterschied jedoch geringer sein.

Bei unbelasteter Achse ist die anfängliche Beschleunigung der Rotation ansehnlich geringer und tritt die normale Geschwindigkeit früher ein, wie folgendes Beispiel erläutert.

2 Januar 1905. Wortmannscher Klinostat, schweres Modell.

Achse nur mit der Kupferscheibe mit den 8 Nadeln belastet. Ablesung wieder kurz nachdem die Umdrehungsachse in das Gehwerk geschaltet war.

Umdrehung.	1	2	3	4	im Durchschnitt.	
1ter Oktant.	106	99	95	94	$98\frac{2}{4}$	
2ter „	115	101	95	98	$102\frac{1}{4}$	
3ter „	115	100	98	95	102	405 Sek. pro Hälfte.
4ter „	113	99	95	96	$100\frac{3}{4}$	
5ter „	110	97	96	97	100	
6ter „	104	99	94	93	$97\frac{2}{4}$	
7ter „	104	94	94	97	$97\frac{1}{4}$	391 „ „ „ .
8ter „	104	95	96	96	$97\frac{3}{4}$	

Summe der beiden Hälften 796 Sek.
Unterschied „ „ „ 14 „

Am Ende der dritten Umdrehung ist die Schnelligkeit schon nicht grösser als in der zweiten.

Wenn die normale Geschwindigkeit erreicht ist, ist der Unterschied der beiden Umdrehungshälften viel geringer als in der Tabelle. Die bei nicht mehr zunehmender Geschwindigkeit zurückgelegte dritte und vierte Umdrehung ergeben im Durchschnitt 385 und 379½ Sek. für die Hälften der Umdrehung. Dieser Unterschied ist weniger als die Hälfte des Unterschiedes in der Tabelle.

Für ein genaues Studium der Rotation reicht auch die zuletzt benutzte Methode noch nicht aus. Es haften ihr drei Mängel an. Erstens ist es schwierig, die 8 Nadeln genau in radialer Richtung und in derselben Entfernung von einander zu befestigen. Zweitens ist es sehr ermüdend, eine lange Zeit mit voller Aufmerksamkeit die elektrischen Klingelsignale zu erwarten und schnell die Stellung des Sekundenzeigers abzulesen. Drittens ist eine solche Ablesung zu grob und fällt sie den persönlichen Fehlern des Beobachters anheim.

Um eine gute Einsicht in die Rotierungsweise zu gewinnen, dachte ich mir, die Umdrehung in kleinen Intervallen graphisch zu messen mittelst des Kymographions.

Zu diesem Zweck wurden in der Kupferscheibe, nachdem die 8 Nadeln entfernt waren, 50 spitze Zähne gefräst. Wenn die an der Umdrehungsachse befestigte Scheibe rotierte, berührten die Zähne der eine nach dem anderen ein Stückchen einer sehr dünnen Uhrfeder, das unten in einer Stativklemme senkrecht befestigt war.

Der Strom eines Leclanché-Elementes wurde durch den Klinostaten mit Achse und Zahnscheibe, durch die Uhrfeder, durch einen kleinen Elektromagnet, nach dem Elemente zurück geleitet. Das Anker des Elektromagneten war mit einer Schreibvorrichtung versehen, welche eine Linie auf die rotierende Trommel des Kymographions schrieb. Das benutzte Kymographion war verfertigt von E. Zimmerman in Leipzig. Die Umlaufzeit der Trommel war zwischen 2 und 90 Sekunden verstellbar. Die Senkung bei jeder Umdrehung war ebenfalls durch Verwechselung von Zahnrädern verstellbar.

Als Schreibvorrichtung erwies sich nur die übliche federnde Metallspitze brauchbar, welche auf das berusste Glacépapier der Kymographentrommel schrieb. Das Glacépapier wurde mit Leim um die Trommel befestigt und mit einer breiten Petroleumflamme berusst. Die Schreibspitze war ein dünn ausgewälzter 3 mm breiter Streifen von Aluminiumblech, welcher zwischen den Nageln von Daumen und Finger durchgezogen war um dem Ende eine federnde Biegung zu geben. Der Streifen war mit Siegellack am Anker des Elektromagneten befestigt und die Spitze war mit der Schere sehr fein zugespitzt.

Jedesmal wenn ein Zahn der Scheibe einen Kontakt mit der Uhrfeder machte, wurde die Schreibspitze durch den Elektromagnet für einen kurzen Augenblick aufgehoben. Die in den Russ auf dem Glacépapier eingeritzte Linie zeigte also jeden Kontakt eines Zahnes durch eine plötzliche Ablenkung der geraden Richtung.

Die Zeit, welche die Klinostatenachse zwischen je zwei

Kontakten bei der Umdrehung brauchte, wurde in der üblichen Weise angegeben durch eine Wellenlinie, welche neben der erstgenannten Linie in den Russ eingeritzt wurde durch ein Chronoskop.

Ich benutzte ein Chronoskop von folgender Form. Einige auf einem schweren Metallfuss befestigten metallenen Stäbe von verschiedener Länge und Dicke waren mit einem verschiebbaren Gewichte versehen, das so gestellt war dass die Stäbe eine Schwingung vollführen konnten in resp. $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{5}$, $\frac{1}{10}$ und $\frac{1}{25}$ Sekunde. Die Schwingungen wurden konstant gehalten durch einen Elektromagnet mit Stromschliesser, durch welchen der Strom eines Akkumulators geleitet wurde. Der schwingende Stab bewegte ein Luftkissen, welches die Mareysche Trommel in Bewegung setzte. Diese Trommel schrieb die Zeitkurve neben der „Klinostatenkurve" in den Russ. Die Russpapiere wurden, nachdem sie beschrieben worden waren, mit Hülfe alkoholischer Schellacklösung fixiert.

Die Methode mit dem Kymographion habe ich nur wenige Male beim Wortmannschen Klinostaten angewendet; bei dem Mollschen wurde sie öfters benutzt. Für den Wortmannschen genüge das folgende Beispiel.

3 Februar 1905. Wortmannscher Klinostat, schweres Modell.

Umdrehungsachse belastet mit der Zahnscheibe und dem gewöhnlichen Topfhalter mit einem mit feuchten Sägespänen gefüllten Topf. Der Topf mit Sägespänen wog 680 g, der Topfhalter 470 g. Die Last wurde mit grosser Sorgfalt äquilibriert mit Hülfe der ublichen Zentrierungsvorrichtung. Die Umlaufzeit war etwas mehr als 13 Minuten.

Die 50 Zähne der Scheibe waren mit Inktziffern numeriert, um jegliche Verwirrung zu vermeiden. Die Zeitkurve wurde vom grössten Stabe des Chronoskopes geschrieben, die Wellenlinie auf dem Russpapier zeigte somit halbe

Sekunden an, welche die Zeit der Zahnintervallen sehr leicht in Viertelsekunden schätzen liessen.

Die Kymographentrommel machte eine Umdrehung in 4 Minuten und senkte sich bei jeder Umdrehung um 13 mm. Es konnten so auf die Trommel etwas mehr als zwei Umdrehungen der Klinostatenachse registriert werden.

UMDREHUNG.	1	2	3	4	UMDREHUNG.	1	2	3	4
Zahn 50–1		16	$15\frac{3}{4}$	$16\frac{1}{4}$	Zahn 25–26		$15\frac{3}{4}$	$15\frac{3}{4}$	
1–2		$16\frac{1}{4}$	$17\frac{1}{4}$	$17\frac{2}{4}$	26–27		15	$15\frac{2}{4}$	
2–3		$16\frac{3}{4}$	17	$17\frac{3}{4}$	27–28		$16\frac{1}{4}$	$15\frac{2}{4}$	
3–4		$16\frac{2}{4}$	$16\frac{3}{4}$	$16\frac{1}{4}$	28–29		$15\frac{3}{4}$	$16\frac{3}{4}$	
4–5		$16\frac{1}{4}$	$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$	29–30		$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	
5–6		$15\frac{3}{4}$	$16\frac{2}{4}$	16	30–31		$14\frac{3}{4}$	$15\frac{2}{4}$	
6–7		$16\frac{2}{4}$	$16\frac{3}{4}$	17	31–32		$15\frac{1}{4}$	16	
7–8		$17\frac{1}{4}$	$16\frac{2}{4}$		32–33		$15\frac{2}{4}$	16	
8–9		$16\frac{1}{4}$	$16\frac{3}{4}$		33–34		$14\frac{2}{4}$	$14\frac{2}{4}$	
9–10		$17\frac{1}{4}$	$16\frac{3}{4}$		34–35		15	$15\frac{2}{4}$	
10–11		17	$17\frac{3}{4}$		35–36		15	$15\frac{1}{4}$	
11–12		18	18		36–37		$14\frac{2}{4}$	$14\frac{3}{4}$	
12–13		$18\frac{1}{4}$	18		37–38		15	$15\frac{2}{4}$	
13–14		$17\frac{1}{4}$	18		38–39		$15\frac{1}{4}$	15	
14–15		$17\frac{2}{4}$	17		39–40	$15\frac{1}{4}$	$14\frac{2}{4}$	$14\frac{3}{4}$	
15–16		$18\frac{2}{4}$	$18\frac{2}{4}$		40–41	15	$15\frac{2}{4}$	16	
16–17		$15\frac{3}{4}$	$14\frac{1}{4}$		41–42	$15\frac{2}{4}$	16	$15\frac{3}{4}$	
17–18		16	18		42–43	15	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	
18–19		$16\frac{2}{4}$	16		43–44	$14\frac{3}{4}$	$14\frac{3}{4}$	$14\frac{2}{4}$	
19–20		16	$16\frac{2}{4}$		44–45	$15\frac{2}{4}$	15	$15\frac{2}{4}$	
20–21		$17\frac{1}{4}$	$17\frac{3}{4}$		45–46	16	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	
21–22		$17\frac{2}{4}$	$16\frac{3}{4}$		46–47	15	15	$15\frac{3}{4}$	
22–23		$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$		47–48	$14\frac{2}{4}$	15	$14\frac{3}{4}$	
23–24		$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$		48–49	$16\frac{2}{4}$	$16\frac{1}{4}$	$16\frac{1}{4}$	
24–25		$16\frac{1}{4}$	16		49–50	$14\frac{1}{4}$	$15\frac{3}{4}$	$15\frac{2}{4}$	

Es zeigt diese Tabelle, dass dieselben Zahnabstände bei den aufeinander folgenden Umdrehungen meistens in ungefähr derselben Zeit zurückgelegt wurden, so dass die Rotation während des Versuches ziemlich konstant blieb.

Einige Zahnintervalle sind grösser als ihre Nachbarn, z. B. Zahn 15—16, der gerade an den sehr kleinen Intervall

16—17 grenzt. Hier ist der Kontakt des Zahnes 16 wahrscheinlich etwas verspätet, doch ist nicht zu denken an eine Ungleichmässigkeit der Zahnabstände. Die Fräsmaschine verursachte keine so grossen Fehler, was auch dadurch bewiesen wird dass in keiner der anderen erhaltenen Kurven der Zahn 15 grösser war als seine Nachbarn.

Die Tabelle zeigt weiter, dass die Zahnintervalle unter sich viele individuellen Unterschiede zeigen und dass die erste Hälfte der Rotation eine viel grössere Zeit in Anspruch genommen hat als die zweite Hälfte. Letzteres wird noch deutlicher, wenn wir die Intervalle zu je fünf aufzählen.

Umdrehung.	1	2	3	4
Zahn 50–5		81¾	83¼	84¼
5–10		83	83¼	
10–15		88	88¾	
15–20		82¾	83¼	
20–25		84	83¾	
25–30		78¼	79	
30–35		75	77¾	
35–40		74¼	75¼	
40–45	75¾	76¾	77¼	
45–50	76¼	77¾	77¾	

Zahn 50—25 ergeben zusammen bei der 2ten Umdrehung $419\,^3/_4$ Sek., bei der 3ten Umdrehung 422 Sek. Zahn 25—50 ergeben zusammen bei der 2ten Umdrehung $381\,^3/_4$ Sek., bei der 3ten Umdrehung $386\,^3/_4$ Sek. Der Unterschied der beiden Hälften ist somit $37\,^3/_4$ Sek. resp. $35\,^1/_4$ Sek., was einen prozentisch viel grösseren Fehler darstellt als für die meisten Versuche zulässig ist. Und doch konnte mit der Zentrierungsvorrichting die Last nicht noch genauer äquilibriert werden.

Die Methode mit dem Kymographion ist nicht geeignet für eine ausgedehnte Anwendung. Das Zählen der Zeit-

kurve, um die Zahnintervalle auf dem Russpapier zu bestimmen ist eine mühsame und langweilige Arbeit. Erst nach einigen Stunden kennt man das Resultat des Zählens, das am besten unter einer guten Lupe im Lupenstativ stattfindet.

Für die noch zu lösenden Fragen über die Beziehung zwischen Übergewicht und ungleichmässiger Drehung und zwischen ungleichmässiger Drehung und physiologischer Reaktion der Keimlinge musste ich mich daher nach einer bequemeren und ungefähr ebenso genauen Methode umsehen. Diese wurde gefunden mit Hülfe der Chronographen, welche mit ihrem Sekundenzeiger Viertel oder Fünftel von Sekunden anzeigen und durch einen Druck auf die Remontoirkrone zu laufen anfangen, resp. gehemmt werden und auf Null zurückspringen.

Ich überzeugte mich zuvor, dass sie ungefähr dieselbe Genauigkeit erreichte wie die graphische Methode. Zu diesem Zweck hatte ich während eines Teiles der mit dem Kymographion registrierten oben beschriebenen Umdrehungen des Klinostaten dieselben Zahnintervalle mit zwei Chronographen bestimmt, welche abwechselnd benutzt wurden. Der Hebel des Elektromagneten der Schreibvorrichtung wurde beim Kontakt eines Zahnes mit einem deutlichen Schlag emporgehoben, indem die in dem Russ eingeritzte Linie plötzlich nach oben abwich. Bei diesem Signal drückte ich auf die beiden Kronen, wodurch die eine Uhr zu laufen anfing, die andere gehemmt und abgelesen wurde. Nach dem Ablesen und Notieren wurde die zweite Uhr durch abermaliges Drücken auf Null zurückgesetzt, um für den folgenden Kontakt fertig zu sein.

Die folgende Tabelle zeigt, dass eine genügende Übereinstimmung zwischen Kymographion und Chronographen anwesend war, und dass somit der persönliche Fehler des zu spät Drückens auf die Kronen kein Hindernis fur diese Methode des Registrierens war.

	2te Umdr.		3te Umdr.		4te Umdr.	
	Kym.	Chron.	Kym.	Chron.	Kym.	Chron.
Zahn 50–1			$15\frac{3}{4}$	16	$16\frac{1}{4}$	$15\frac{3}{4}$
1–2			$17\frac{1}{4}$	$17\frac{1}{4}$	$17\frac{2}{4}$	$17\frac{2}{4}$
2–3			17	17	$17\frac{3}{4}$	$17\frac{3}{4}$
3–4			$16\frac{3}{4}$	$16\frac{1}{4}$	$16\frac{1}{4}$	16
4–5			$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$
5–6			$16\frac{2}{4}$	16		
6–7			$16\frac{3}{4}$	$16\frac{2}{4}$		
7–8			$16\frac{2}{4}$	$16\frac{1}{4}$		
8–9			$16\frac{3}{4}$	$16\frac{2}{4}$		
9–10			$16\frac{3}{4}$	$16\frac{1}{4}$		
10–11			$17\frac{3}{4}$	$17\frac{2}{4}$		
11–12			18	$17\frac{2}{4}$		
12–13			18	$17\frac{2}{4}$		
13–14			18	18		
14–15			17	$16\frac{3}{4}$		
15–16			$18\frac{2}{4}$	$18\frac{1}{4}$		
16–17			$14\frac{1}{4}$	$14\frac{1}{4}$		
17–18			18	$17\frac{2}{4}$		
18–19			16	$15\frac{3}{4}$		
19–20			$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$		
20–21			$17\frac{3}{4}$	$17\frac{3}{4}$		
21–22	$17\frac{2}{4}$	$17\frac{2}{4}$	$16\frac{3}{4}$	$16\frac{3}{4}$		
22–23	$16\frac{2}{4}$	$16\frac{1}{4}$	$16\frac{2}{4}$	16		
23–24	$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$	$16\frac{2}{4}$		
24–25	$16\frac{1}{4}$	16	16	$15\frac{2}{4}$		
25–26	$15\frac{3}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{3}{4}$	$15\frac{2}{4}$		
26–27	15	15	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$		
27–28	$16\frac{1}{4}$	16	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{1}{4}$		
28–29	$15\frac{3}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$16\frac{3}{4}$	$16\frac{2}{4}$		
29–30	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$		
30–31	$14\frac{3}{4}$	$14\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$		
31–32	$15\frac{1}{4}$	15	16	$15\frac{2}{4}$		
32–33	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	16	16		
33–34	$14\frac{2}{4}$	$14\frac{1}{4}$	$14\frac{2}{4}$	$14\frac{2}{4}$		
34–35	15	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{1}{4}$		
35–36	15	$14\frac{3}{4}$	$15\frac{1}{4}$	15		
36–37	$14\frac{2}{4}$	$14\frac{2}{4}$	$14\frac{3}{4}$	$14\frac{2}{4}$		
37–38	15	$14\frac{3}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$		
38–39	$15\frac{1}{4}$	15	15	$14\frac{3}{4}$		
39–40	$14\frac{2}{4}$	$14\frac{2}{4}$	$14\frac{3}{4}$	$14\frac{3}{4}$		
40–41	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{1}{4}$	16	16		
41–42	16	16	$15\frac{3}{4}$	$15\frac{2}{4}$		
42–43	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$		
43–44	$14\frac{3}{4}$	$14\frac{3}{4}$	$14\frac{2}{4}$	14		
44–45	15	$14\frac{3}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$14\frac{2}{4}$		
45–46	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{1}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$		
46–47	15	$14\frac{3}{4}$	$15\frac{3}{4}$	$15\frac{1}{4}$		
47–48	15	15	$14\frac{3}{4}$	$14\frac{3}{4}$		
48–49	$16\frac{1}{4}$	$16\frac{2}{4}$	$16\frac{1}{4}$	$16\frac{1}{4}$		
49–50	$15\frac{3}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{2}{4}$	$15\frac{1}{4}$		

Im allgemeinen sind die mit den Chronographen gefundenen Werte etwas geringer als die, welche mittelst des Kymographions erhalten wurden. Dies wird dadurch verursacht, dass der Stab des Chronoskopes etwas mehr als zwei Schwingungen pro Sekunde macht. Nur die ersten Chronographenablesungen von Zahn 34, 48 und 50 sind etwas grösser als die Kymographenwerte, was von persönlichen Fehlern herrühren könnte.

Von jetzt an benutzte ich mithin die Chronographen. Die Intervalle wurden nicht mehr zwischen je zwei Zähnen der Scheibe, sondern zwischen je fünf Zähnen bestimmt. Bei jedem fünften Kontakt wurde auf die Kronen der zwei Uhren gedrückt, das beendigte Intervall notiert und die erste Uhr wieder auf Null gestellt.

Die benutzten Chronographen wurden durch zahlreiche Versuche geprüft ob sie dieselbe Regulierung und Regelmässigkeit des Laufens besassen. Sie wurden unter einander verglichen in Zeiträumen von einigen Sekunden bis einigen Stunden, und sie wurden ausserdem verglichen mit den Schwingungen eines langen Pendels. Eine gewisse Zahl dieser Schwingungen wurde z. B. verschiedene Male hinter einander mit derselben Uhr bestimmt, wofür ich Reihen fand wie die folgende: $37^3/_4$, $37^3/_4$, $37^3/_4$, $37^2/_4$, $37^1/_4$, $37^3/_4$, $37^2/_4$, $37^2/_4$, $37^3/_4$, $37^1/_4$, $37^2/_4$ Sekunden. Die Abweichung von + oder — $^1/_4$ Sekunde ist zwar nicht gering, doch kann man sie nur erwarten, erstens wegen des persönlichen Fehlers beim Drucken, zweitens weil die kleinste von dieser Uhr angegebene Zeiteinheit $^1/_4$ Sekunde ist.

Die Methode mit den zwei Chronographen ist von mir vielfach angewendet worden; es wurde mit ihrer Hülfe bewiesen, dass die periodische Ungleichmässigkeit der Rotation genau abhängig war von dem Übergewicht der Last. Ich werde sie die einfache Chronographenmethode nennen.

Als ich später eine noch grössere Genauigkeit brauchte

als mit dem Chronographen möglich war, sah ich mich um nach Methoden, welche viel kleinere Zeiträume als Viertelsekunden bestimmen können. Es ist dies eine schwierige Aufgabe, denn die genau zu messenden aufeinander folgenden Zeiträume waren zusammen Stunden lang. Das Kymographion hatte keinen Raum genug auf seiner Trommel und seine Handhabung war zu zeitraubend. Die Streifenapparate der Astronomen, wie das Hippsche Chronograph, würden auch zu viel Zeit nehmen; es würden ganze Haufen des Streifens bewältigt werden müssen. Ich versuchte noch, die Münsterbergsche Uhr anzuwenden, welche in der Psychologie benutzt wird um Reaktionszeiten zu bestimmen. Das Instrument zeigte Hundertstel von Sekunden und war verfertigt von H. Elbs zu Freiburg. Die Uhr lief nach einmaligem Aufziehen $12^1/_2$ Minuten. Der grosse Sekundenzeiger machte eine Umdrehung in 5 Sekunden, und konnte mittelst eines Hebels in jedem Augenblick gehemmt werden. Das Zifferblatt war in 500 Teilen verteilt.

Ich verglich ausführlich den Lauf dieser Uhr mit einer gut kontrollierten Chronohraphenuhr. Nach zahlreichen Versuchen stellte er sich heraus, dass die Uhr für meinen Zweck ganz untauglich war. Wenn sie schon die Hundertstelsekunden mit einem prozentisch geringen Fehler andeutete, machte sie jedoch in den Sekunden einen prozentisch eben so grossen Fehler. Sie ist also nur brauchbar für ihren eigentlichen Zweck, d. h. die Messung von sehr kleinen Zeiträumen. Grössere Zeiträumen zeigt sie weniger genau als die gewöhnlichen Uhren. Ein einziges Beispiel sei hier genannt. Nachdem die Uhr aufgezogen war, wurde sie dreimal mit dem Hebel gehemmt und wieder in Gang gesetzt, jedesmal nach genau derselben — mit dem Chronographen bestimmten — Zeit von etwas mehr als 4 Minuten. In diesen drei gleich langen Zeiträumen zeigte die Uhr resp. 243,63 Sek., 244,19 Sek. und 243,51 Sek.

Ich hatte inzwischen eine Vorrichtung angefertigt um die grosse Reaktionszeitenuhr mittelst eines Elektromagneten zu hemmen oder in Gang zu setzen. Sie gefiel mir so gut, dass ich sie für den Chronographen benutzte, als sie für die grosse Uhr nicht mehr nötig war.

Diese Vorrichtung war in ihrer neuen Form gebaut wie es Fig. 1, A, zeigt. Das Anker 1 des Elektromogneten 2 zieht mittelst der Stange 3 an den Hebel 4, welcher drehbar ist um den Zapfen 5, und der durch eine Feder wieder zurückgedrückt wird. Der Hebel drückt mit der Gummiplatte 6 auf die Krone 7 des Chronographen 8, welcher mit dem untern Rande gegen das Holzblock 9 stützt. Der Elektromagnet hat zwei Eisenkerne von 12 mm dicke und 90 mm Länge, welche in einem schweren viereckigen Eisenstück 10 geschraubt sind. Die Spindeln von Buchsbaumholz haben etwas mehr als 1 mm Wanddicke; die Kragen sind 5 mm dick und 44 mm im Durchmesser. Auf die zwei Spindeln zusammen wurden 81 Meter gewöhnliches Klingelleitungsdraht gewunden, mit 0,85 mm Durchmesser des Kupfers und umsponnen mit Baumwolle. Der Widerstand dieses Drahtes ist ungefähr $3^1/_4$ Ohm, was beim Gebrauch von 3 Akkumulatoren einem strom von 1,85 Ampere entspricht. Dieser Strom reichte aus um die Krone des Chronographen genügend einzudrücken; doch habe ich mehrmals einen etwas stärkeren Strom benutzt um eine ganz sichere Wirkung zu erzielen.

Der Stromkreis des Elektromagneten wird von dem rotierenden Klinostaten, Fig. 1, *B*, geschlossen mittelst eines Relais. Dieses besteht aus der Wippe, welche auf Fig. 1, *C*, abgebildet ist. Die kleine eiserne, leicht drehbare Wage 14 trägt an ihrem einem Ende die Platinspitze 15. Diese Spitze taucht in einer eisernen Wanne 16 mit Quecksilber 17, wenn die Wage nach dieser Seite umkippt. Unter diesem Arme der Wage steht ein kleiner Elektromagnet 18,

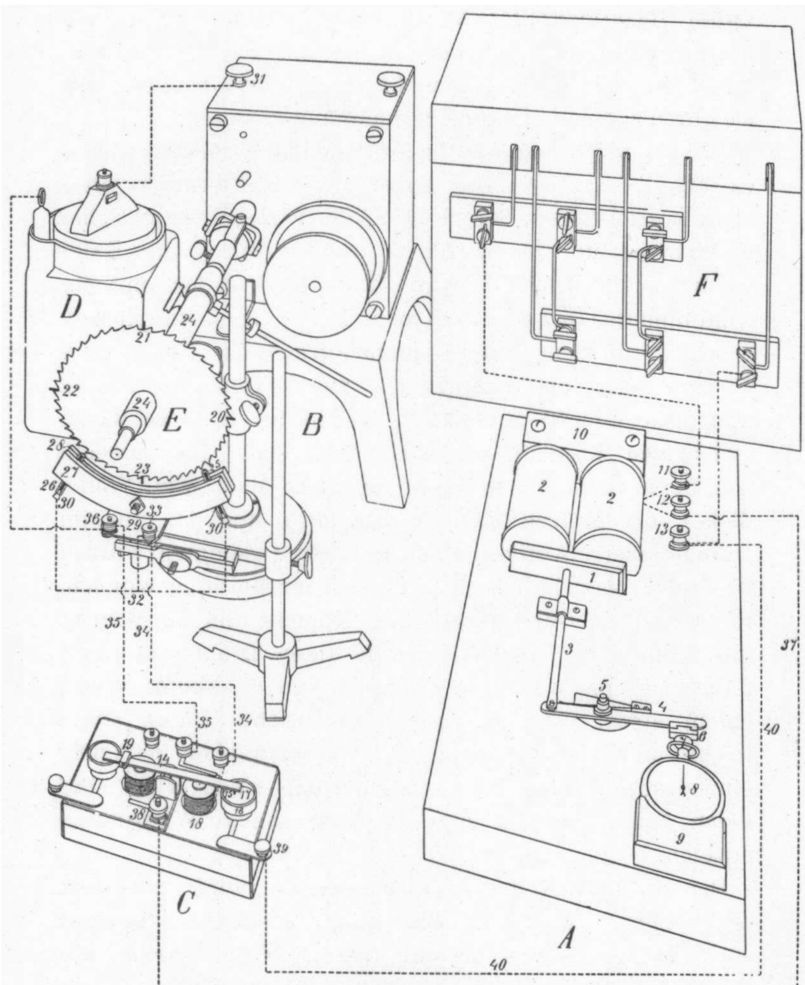


Fig. 1. Aufstellung für die automatische Chronographenmethode zur Bestimmung der Klinostatendrehung.

der die Wage kippen kann und dadurch den Stromkreis durch Platinspitze und Quecksilberwanne schliesst. Sobald der Strom des kleinen Elektromagneten aufhört, kippt die Wage jedoch zurück, weil der andere Arm schwerer ist durch das verschiebbare Kupferstück 19.

Die Wippe wurde für andere Zwecke symmetrisch gebaut und ist hier in dieser vollständigen Form abgebildet. Behufs des Gebrauches als Relais muss das verschiebbare Kupferstück nicht weiter vom Drehpunkt der Wage festgeschraubt werden als nötig ist um die Wage nach links zu kippen. Der Strom eines Elementes genügt dann um die Wage mittelst des Elektromagneten 18 rechts nach unten zu ziehen. Der Stromkreis des grossen Elektromagneten, der für die Handhabung des Chronographen dient, is durch die Wage und Quecksilberwanne geleitet und wird mithin geschlossen, wenn ein Strom durch den kleinen Elektromagnet 18 geht. Dieser Strom kommt von dem Leclanché-Element, Fig. 1, *D*, und wird vom Klinostaten bei jeder Viertelumdrehung der Achse zwei Mal geschlossen.

Zu diesem Zweck sind in der früher beschriebenen Zahn scheibe, Fig. 1, *E*, vier gleich lange Platinspitzen 20, 21 22, 23 befestigt, welche genau in 90° Entfernung von einander stehen und am Umkreis der Zahnspitzen hervor ragen. Unter der Scheibe *E*, die an der Umdrehungsachse 24 befestigt ist, stehen zwei mit Quecksilber gefüllte Glasröhrchen 25 und 26, welche zwischen zwei Holzstreifen 27 und 28 an das Kupferstück 29 geklemmt sind.

Die zwei Röhrchen sind auswendig $3^1/_2$, inwendig $2^1/_2$ mm im Durchmesser und 35 mm lang. Sie stehen in einer Entfernung von 77° und in der Richtung zweier Scheibenradien. Sie sind unten geschlossen durch ein zylindrisches Körkchen 30, das von einem Silberdraht durchbohrt ist. Die Körkchen können ein wenig hin und her geschoben werden um die Quecksilbertropfen, die oberhalb der Mündung der Röhrchen hervorragen, su vergrössern oder zu

verkleinern. Die beiden Röhrchen werden so dicht bei der Scheibe gestellt, dass die vier Platinspitzen gerade durch die Quecksilbertropfen oben an den Röhrchen streichen.

Wenn eine Spitze den Tropfen des Röhrchens 25 berührt, geht der Strom vom Leclanché-Elemente *D* nach der Klemmschraube 31, durch die Klinostatenachse 24 und die Scheibe E, durch die genannte Spitze, durch das Quecksilber, den Leitungsdraht 32, die Klemmschraube 33, den Leitungsdraht 34, den kleinen Elektromagnet 18, den Leitungsdraht 35, die isolierte Klemmschraube 36, nach dem Elemente *D* zurück.

Die Wage wird also für einige Augenblicke umgekippt, der Stromkreis der 3 Akkumulatoren, Fig. 1, *F*, durch die Quecksilberwanne 16 u. s. w. geschlossen und der Chronograph fängt an zu gehen. Selbstverständlich geschieht dies fast sogleich nach der Berührung des Tropfens.

Der letztgenannte Stromkreis geht von den Akkumulatoren *F* nach der Klemmschraube 11, durch den Elektromagnet 2, die Klemmschraube 12, den Leitungsdraht 37, die Klemmschraube 38, die Wage 14, die Platinspitze 15, das Quecksilber 17, die Wanne 16, die Klemmschraube 39, den Leitungsdracht 40, die Klemmschraube 13, nach den Akkumulatoren *F* zurück.

Wenn die Spitze 77° weiter rotiert hat und den Tropfen des Röhrchens 26 berührt, wird die Wage wieder in ganz derselben Weise gekippt und der Chronograph gehemmt. Die Stellung des Sekundenzeigers wird dann notiert und der Zeiger durch einen Druck mit der Hand auf Null zurückgestellt. Bald darauf hat wieder die folgende Spitze den ersten Tropfen erreicht und wiederholt sich alles von neuem, vier Mal in jeder Umdrehung.

Bei der Untersuchung von schnelleren Rotationen war kaum Zeit genug um die Uhr jedesmal abzulesen und wieder auf Null zu stellen. Dann wurde ein dünnes Federchen oder ein drittes Quecksilberröhrchen links neben dem Röhrchen 26 aufgestellt. Die dadurch verursachte

dritte Berührung der Platinspitze stellte den Zeiger dann wieder automatisch auf Null. — Der sehr plötzliche Druck des Elektromagneten verursachte im Anfang biswielen, dass der Sekundenzeiger sich von seinem Zapfen löste. Der Zeiger musste daher sehr fest auf den Zapfen gedrükt werden.

Die beschriebene Methode wurde bei den späteren Versuchen ausschliesslich benutzt; ich nenne sie die automatische Chronographenmethode.

Ihre Vorteile über alle anderen Methoden sind:

1. Es wird nur ein gut kontrollierter Chronograph gebraucht, anstatt zwei, welche einen kleinen Unterschied des Ganges zeigen könnten.

2. Die Ablesung unterliegt nicht mehr dem persönlichen Fehler.

3. Es brauchen durch verminderte Aufmerksamkeit keine Beobachtungen aus einer längeren Reihe zu fehlen, was bei der einfachen Chronographenmethode leicht vorkommt.

4. Man kann längere Beobachtungsreihen machen, weil man zu gleicher Zeit andere leichte Arbeiten tun kann. Die längere Reihe eliminiert die zufälligen Abweichungen in der Drehung, und gewinnt dadurch eine grössere Genauigkeit des durchschnittlichen Wertes.

5. Die Entfernung der vier Platinspitzen an der Scheibe braucht nicht mehr peinlich genau dieselbe zu sein. Von jedem Quadrant wird der grössere Teil (etwa 77°) bestimmt zwischen den zwei Kontakten, die immer dieselbe Stellung behalten. Die Zeiträume, worin dieser Abstand von den vier Spitzen zurückgelegt wird, sind somit unter sich ganz vergleichbar und stellen ein gutes Maass dar für die Schnelligkeit der Klinostatendrehung in den vier Quadranten.

6. Der Quecksilbertropfen verursacht beim Kontakt keine Reibung, die den Lauf des Klinostaten beeinflussen könnte.

Nachdem jetzt die benutzten Methoden erklärt sind, müssen wir daran schreiten, die erhaltenen Resultate mit-

zuteilen. Insofern noch Abweichungen der angegebenen Methoden Anwendung fanden, werden diese an den betreffenden Stellen besprochen.

Schon bei der Anwendung der einfachsten, im Anfang beschriebenen Methoden hat sich herausgestellt, dass die Umdrehung der Klinostatenachse oft eine Ungleichmässigkeit zeigte, welche sich gerade so verhielt als wenn die Regulierung des Gehwerkes von einem Übergewicht beeinflusst wäre. Dies ist in Wirklichkeit die Erklärung der periodischen Ungleichmässigkeit. Wenn der Schwerpunkt steigt, wird die Umdrehung verlangsamt. Wenn er sich senkt, wird die Umdrehung beschleunigt. Die folgenden Versuche dienen als Beleg dazu.

6 Febr. 1905. Wortmannscher Klinostat, schweres Modell.

Achse belastet mit der Scheibe mit 50 Zähnen, mit dem Topfhalter der 470 g wägt, und einem Topf mit feuchten Sägespänen der 570 g wägt. Last zentriert; Stift der Zentrierungsvorrichtung in der Richtung von Zahn 8; das Gewicht von 60 g unmittelbar an die Achse geschoben. Einfache Chronographenmethode, also mit zwei Chronographen, die mit der Hand abwechselnd in Bewegung gesetzt und gehemmt wurden beim Kontakt eines jeden fünften Zahnes der Scheibe (wie oben beschrieben wurde). Kontaktfeder gerade in der Mitte unter der Scheibe.

Umdrehung.	1	2	3	im Durchschnitt.	
Zahn 50— 5	81	79	$78\frac{3}{4}$	$79\frac{7}{12}$	395 Sek. pro Hälfte.
5—10	$79\frac{2}{4}$	77	77	$77\frac{10}{12}$	
10—15	85	$81\frac{3}{4}$	$82\frac{1}{4}$	83	
15—20	$76\frac{2}{4}$	$77\frac{1}{4}$	$77\frac{1}{4}$	77	
20—25	78	$77\frac{1}{4}$	$77\frac{2}{4}$	$77\frac{7}{12}$	
25—30	$73\frac{1}{4}$	$73\frac{3}{4}$	$74\frac{1}{4}$	$73\frac{9}{12}$	$360\frac{1}{6}$ Sek. pro Hälfte.
30—35	73	$72\frac{1}{4}$	$72\frac{1}{4}$	$72\frac{6}{12}$	
35—40	$71\frac{2}{4}$	$69\frac{1}{4}$	69	$69\frac{11}{12}$	
40—45	$73\frac{1}{4}$	72	$71\frac{1}{4}$	$72\frac{2}{12}$	
45—50	72	$72\frac{2}{4}$	71	$71\frac{10}{12}$	

Summe der beiden Hälften $755\frac{1}{6}$ Sek.
Unterschied " " " $34\frac{5}{6}$ "

Aus dieser Tabelle ergiebt sich, dass die Bewegung am langsamsten ist wenn Zahn 12 bis 13 die Kontaktfeder passiert ist. Dies könnte darauf hinweisen, dass der Schwerpunkt der Last in diesem Augenblick steige und ungefähr in der horizontalen Ebene durch die Achse stehe. Der Schwerpunkt läge dann ungefähr bei Zahn 50. Die eine Hälfte der Umdrehung dauert 34$\frac{5}{6}$ Sek. länger als die andere Hälfte.

Ich verstellte den Klinostaten nun ein weinig, so dass die Umdrehungsachse nicht mehr ganz genau in der Verlängerung des Triebzapfens stand. Alle Umstände übrigens wie oben.

Umdrehung.	1	2	3	im Durchschnitt.	
Zahn 50 – 5		79$\frac{2}{4}$	77$\frac{2}{4}$	78$\frac{2}{4}$	
5 – 10		78	77	77$\frac{2}{4}$	
10 – 15		82$\frac{2}{4}$	83$\frac{2}{4}$	83	394$\frac{3}{4}$ Sek pro Hälfte.
15 – 20		78	77$\frac{2}{4}$	77$\frac{3}{4}$	
20 – 25		78	78	78	
25 – 30	74	73	74$\frac{1}{4}$	73$\frac{3}{4}$	
30 – 35	73$\frac{1}{4}$	71	73$\frac{1}{4}$	72$\frac{2}{4}$	
35 – 40	71	70$\frac{1}{4}$	70	70$\frac{5}{12}$	359$\frac{11}{12}$ „ „ „
40 – 45	71$\frac{3}{4}$	71		71$\frac{3}{8}$	
45 – 50	72	71$\frac{3}{4}$		71$\frac{7}{8}$	

Summe der beide Hälften 754$\frac{2}{3}$ Sek.
Unterschied „ „ „ 34$\frac{5}{6}$ „

Die Tabelle zeigt, dass die Rotierung fast keinerlei Veränderung erfahren hat durch die vorgenommene Verstellung.

Ich verstellte nun den Klinostaten derart, dass der Triebzapfen ungefähr einen Winkel von 176° oder 177° mit der Umdrehungsachse machte und die zwei Arme des Gelenkes mithin einen deutlichen Winkel bildeten. Alle Umstände übrigens wie oben.

Umdrehung.	1	2	3	im Durchschnitt.	
Zahn 50– 5	88¾	89¼	86¾	88 1/12	
5–10	89¼	89¼	84¾	87 9/12	
10–15	96	92		94	447 1/12 Sek. pro Hälfte.
15–20	90	87		88¾	
20–25	90¼	87¼		88¾	
25–30	85¼	83¼		84¼	
30–35	84	80¼		82⅛	
35–40	82¼	79		80⅝	408 9/12 " " "
40–45	82¾	78¾		80¾	
45–50	83¼	79¼		81¼	

Summe der beide Hälften 855⅝ Sek.
Unterschied " " " 38⅛ "

Aus dieser Tabelle ergiebt sich, dass bei der schiefen Stellung des Gelenkes die Umdrehung viel länger dauert. Offenbar entsteht in dieser Stellung eine Reibung, welche den Gang des Gehwerkes verlangsamt. Die durchschnittliche Umlaufzeit, welche im vorigen Versuch noch 754⅜ Sek. war, ist jetzt zu 855⅝ Sek. gestiegen, also mit 101⅛ Sek. vermehrt. Doch nimmt in der Tabelle die Schnelligkeit wieder zu durch stärkere Spannung der Triebfeder.

Ungeachtet dieser Veränderung ist die Art der Umdrehung jedoch ganz dieselbe geblieben. Noch immer ist die langsamste Drehung bei Zahn 10 bis 15, indem der Unterschied der beiden Umdrehungshälften 38⅛ Sek. beträgt. Das Gelenk kann also nicht etwa Ursache der periodischen Ungleichmässigkeit sein, vielmehr hat es darauf nicht den mindesten Einfluss.

Ich stellte die Umdrehungsachse wieder genau in der Verlängerung des Triebzapfens und entfernte nun das Gewicht vom Stab der Zentrierungsvorrichtung. Die Achse blieb jetzt bei ausgeschaltetem Gehwerk noch in allen Stellungen stehen, so dass keine bestimmte Richtung des Schwerpunktes zu erkennen war. Doch war dies vor dem An-

fang dieser Versuchsreihe nicht der Fall. Damals war der Schwerpunkt der noch nicht zentrierten Last bei Zahn 28, weshalb der Stift nach der entgegengesetzten Seite, d. h. nach Zahn 3 gerichtet und mit dem Zentrierungsgewicht versehen wurde. Der Schwerpunkt musste nach Herabnahme des Gewichtes jetzt noch bei Zahn 28 liegen, und wenn die frei bewegliche Achse sich nicht mehr so drehte dass Zahn 28 unten kam, so konnte dies vom Wasserverlust herrühren den der Topf mit den feuchten Sägespänen inzwischen erlitten hatte.

Einige Stunden nachdem das Gehwerk wieder eingeschaltet war — und die Feder sich also wieder mit normaler Kraft gegen die Last gespannt hatte —, bestimmte ich wieder die Art der Rotation. 7 Februar 1905. Wortmannscher Klinostat, schweres Modell.

Umdrehung.	1	2	3	4	im Durchschnitt.	
Zahn 50— 5	$76\frac{1}{4}$	76	75	$76\frac{1}{4}$	$75\frac{14}{16}$	
5—10	$72\frac{1}{4}$	74	$72\frac{3}{4}$	$72\frac{2}{4}$	$72\frac{14}{16}$	
10—15	71	70	71	$71\frac{1}{4}$	$70\frac{13}{16}$	$356\frac{1}{16}$ Sek. pro Hälfte.
15—20	$70\frac{2}{4}$	$69\frac{3}{4}$	$68\frac{3}{4}$	$69\frac{3}{4}$	$69\frac{11}{16}$	
20—25	$70\frac{3}{4}$	70	68	$70\frac{1}{4}$	$69\frac{12}{16}$	
25—30	$74\frac{3}{4}$	$72\frac{1}{4}$	72	$72\frac{3}{4}$	$72\frac{15}{16}$	
30—35	77	$71\frac{3}{4}$	$74\frac{1}{4}$	76	$74\frac{12}{16}$	
35—40	$80\frac{1}{4}$	77	77	$77\frac{3}{4}$	78	$383\frac{5}{16}$ Sek. pro Hälfte.
40—45	$77\frac{2}{4}$	76	$76\frac{2}{4}$	78	77	
45—50	$77\frac{2}{4}$	78	$77\frac{1}{4}$	78	$77\frac{11}{16}$	

Summe der beiden Hälften $739\frac{3}{8}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $27\frac{1}{4}$ „

Die Tabelle zeigt sofort, dass die Stelle der langsamsten Bewegung nicht mehr dieselbe ist. Die Hälfte von Zahn 5 bis 30 wird in $356^1/_{16}$ Sek., von Zahn 30 bis 5 in $383^5/_{16}$ Sek. zurückgelegt. Dies könnte darauf hinweisen, dass der Schwerpunkt der jetzigen Belastung die horizontale Ebene steigend passiert habe wenn die Mitte der langsamen Hälfte (d. i. Zahn 42 bis 43) die Kontaktfeder passierte.

Der Schwerpunkt läge dann ungefähr bei Zahn 30. Dies versteht sich ganz gut mit den oben erwähnten Erörterungen, aus welchen es sich herausstellte, dass der Schwerpunkt ungefähr bei Zahn 28 lag. Wir können daher schon jetzt als wahrscheinlich annehmen, dass die periodische Ungleichmässigkeit verursacht wird von dem Übergewicht der Last, wenn auch dieses Übergewicht sich gar nicht verrät wenn die Achse freigestellt wird.

Einen weiteren Beweis dafür wurde in folgender Weise geliefert. Die Umdrehungsachse mit Gelenk, Zahnscheibe, Zentrierungsstift ohne Gewicht, Topfhalter und Topf mit Sägespänen wurden in ihrem Zusammenhang vom Klinostaten abgenommen und in derselben Weise an den übereinstimmenden Triebzapfen des originellen Exemplars des Wortmannschen Klinostaten befestigt. Genügend lange Zeit nach dem Einschalten des Gehwerkes wurde die Rotation wieder bestimmt mittelst der einfachen Chronographenmethode.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	im Durchschnitt.	
Zahn 50— 5		$66\frac{3}{4}$	63	65	$62\frac{2}{4}$	$64\frac{5}{16}$	
5—10		$60\frac{1}{4}$	$61\frac{2}{4}$	$61\frac{1}{4}$	$65\frac{3}{4}$	$62\frac{3}{16}$	$302\frac{2}{16}$ Sek. pro Hälfte.
10—15		$58\frac{1}{4}$	$60\frac{1}{4}$	59	60	$59\frac{6}{16}$	
15—20		$58\frac{2}{4}$	59	$57\frac{3}{4}$	$57\frac{1}{4}$	$58\frac{2}{16}$	
20—25		62	$57\frac{3}{4}$	59	$60\frac{2}{4}$	$59\frac{13}{16}$	
25—30		$61\frac{2}{4}$	$61\frac{2}{4}$	$63\frac{2}{4}$	$63\frac{3}{4}$	$62\frac{9}{16}$	
30—35		64	65	$65\frac{2}{4}$	66	$65\frac{2}{16}$	
35—40	$65\frac{1}{4}$	$67\frac{1}{4}$	$67\frac{2}{4}$	$72\frac{3}{4}$		$68\frac{3}{16}$	$331\frac{3}{16}$ Sek. pro Hälfte.
40—45	$65\frac{3}{4}$	$70\frac{1}{4}$	$66\frac{2}{4}$	$66\frac{3}{4}$		$67\frac{5}{16}$	
45—50	$64\frac{3}{4}$	$67\frac{3}{4}$	66	$66\frac{2}{4}$		$66\frac{4}{16}$	

Summe der beiden Hälften $633\frac{1}{4}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $29\frac{1}{8}$ „

Die Tabelle zeigt, dass die Art der Rotation ganz dieselbe geblieben; nur die totale Umlaufzeit ist bei diesem Klinostaten bedeutend geringer. Die langsamste und die schnellste

Hälfte der Umdrehung sind in Bezug auf die Zähne genau so orientiert wie beim ersten Instrumente, und der Unterschied der beiden Hälften ist sogar fast der nämliche: $27\frac{1}{4}$ Sek. resp. $29\frac{1}{8}$ Sek. Die periodische Ungleichmässigkeit wird also in keinerlei Weise vom Gehwerk selbst des Klinostaten verursacht. Vielmehr ist nur die exzentrische Belastung der Umdrehungsachse ihre Ursache.

Die Umdrehungsachse und die daran befestigten Teile wurden jetzt wieder in ihrem Zusammenhang vom Wortmannschen Klinostaten abgenommen und an die langsame Achse des horizontal gestellten Pfefferschen Klinostaten befestigt. Das Gelenk des Wortmannschen wurde jedoch verwechselt für das Gelenk des Pfefferschen selbst, weil erstgenanntes nicht gut um den Triebzapfen passte. Der Trieb des Regulators wurde auf den äusseren Radkranz des Kronrades geschoben und die Windflügel so gestellt, dass die Umlaufzeit ungefähr so gross war wie bei den vorigen Versuchen. Mit den Ablesungen mittelst der einfachen Chronographenmethode wurde angefangen genügend lange nachdem der Klinostat in Gang gesetzt war.

8 Februar 1905.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	im Durchschnitt.	
Zahn 50— 5		$67\frac{1}{4}$	$64\frac{2}{4}$	$68\frac{1}{4}$	$65\frac{2}{4}$	$66\frac{6}{16}$	
5—10		$65\frac{3}{4}$	65	$67\frac{3}{4}$	$64\frac{3}{4}$	$65\frac{13}{16}$	
10—15		$64\frac{1}{4}$	64	64	$64\frac{1}{4}$	$64\frac{2}{16}$	$325\frac{7}{16}$ Sek. pro Hälfte.
15—20		63	64	$65\frac{2}{4}$	$64\frac{3}{4}$	$64\frac{5}{16}$	
20—25	66	$64\frac{2}{4}$	65	65		$65\frac{2}{16}$	
25—30	67	$64\frac{3}{4}$	67	$65\frac{2}{4}$		$66\frac{1}{16}$	
30—35	$68\frac{1}{4}$	$66\frac{2}{4}$	67	65		$66\frac{11}{16}$	
35—40	$70\frac{2}{4}$	$66\frac{1}{4}$	70	$65\frac{3}{4}$		$68\frac{2}{16}$	$336\frac{7}{16}$ Sek. pro Hälfte.
40—45	$68\frac{1}{4}$	67	69	$65\frac{2}{4}$		$67\frac{7}{16}$	
45—50	$68\frac{2}{4}$	66	$69\frac{3}{4}$	67		$67\frac{13}{16}$	

Summe der beiden Hälften $661\frac{7}{8}$ Sek.
Unterscheid „ „ „ 11 „

Es zeigt die Tabelle, dass auch auf dem anders konstruierten Pfefferschen Klinostaten die Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit in Bezug auf die Zähne wieder dieselbe geblieben ist. Nur ist der Unterschied der beiden Hälften um mehr als die Hälfte herabgesunken, was davon herrühren könnte, dass der Pfeffersche Klinostat eine kräftigere Feder besitzt. Es wurden noch einige weiteren Versuche mit dem Pfefferschen Klinostaten angestellt, welche alle darauf hinwiesen, dass nur die Exzentrizität der Belastung die periodische Ungleichmässigkeit der Rotation verursachte.

Um eine endgültige Entscheidung zu treffen, musste ich die Stellung der Schwerpunktes der Belastung genau bestimmen können, diese Stellung willkürlich ändern und jedesmal die Art der Rotation so genau wie möglich bestimmen.

Wir haben schon gesehen, dass die Zentrierungsvorrichtung des Wortmannschen Klinostaten nich ausreichte um eine geringe Exzentrizität zu entdecken. Der Pfeffersche Klinostat besitzt eine noch weniger gute Zentrierungsvorrichtung. Man kann seine Umdrehungsachse nur frei vom Gehwerk stellen indem man die Klemmschraube des Gelenkes zurückdreht. Die Exzentrizität der Belastung, welche durch die Zentrierungsvorrichtung mit Stift und Gewicht aufgehoben werden soll, muss also die Reibung zwischen dem Gelenk und der gelockerten Achse überwinden um die niedrigste Stellung einnehmen zu können. Diese Reibung ist immer noch so gross, dass ein ziemlich ansehnliches Übergewicht von ihr versteckt wird. Ich bestimmte darum von jetzt an den Schwerpunkt der belasteten Umdrehungachse, indem ich diese auf zwei Paar Friktionsrollen legte; es wurden dazu 2 Stative mit Friktionsrollen benutzt, welche den Klinostaten beigegeben werden. In dieser Weise ist eine geringe Exzentrizität der Belastung zu entdecken und mit der Zentrierungsvorrichtung zu kompensieren.

Obwohl bei dem Wortmannschen Klinostaten die freigestellte Achse mit viel weniger Reibung drehen kann, ist doch auch hier eine kleine Exzentrizität nicht aufzufinden. Es wurde darum auch bei ihr in den folgenden Versuchen der Schwerpunkt der aus dem Gelenk genommenen Umdrehungsachse mit Hülfe der zwei Paare Friktionsrollen bestimmt.

Wenn das äussere Ende der Achse nicht durch den Topfhalter eingenommen war, bestimmte ich den Schwerpunkt meistens in einer noch genaueren Weise. Die Achse hatte an ihren beiden Enden eine punktförmige Aushöhlung, mit deren Hülfe sie auf der Drehbank abgedreht worden war. Mit diesen beiden Punkten wurde sie zwischen zwei Nadeln gestellt, wodurch die Reibung bei der Drehung bis auf ein Minimum zurückgeführt war.

Eine geringe Exzentrizität wird nur eine geringe periodische Ungleichmässigkeit der Rotation verursachen. Um diese doch genau zu bestimmen, benutzte ich von jetzt an die automatische Chronographenmethode, welche in bequemer Weise lange und genaue Ablesungsreihen ergab. An die Achse wurde also die Zahnscheibe (Fig. 2) mit den vier gleich langen Platinspitzen befestigt, welche letzteren die Scheibe in vier Quadranten verteilten; Zahn 50 bis 21½, 12½ bis 25, 25 bis 37½ und 37½ bis 50 [1]) Die Umdrehungsachse wurde mit Hülfe einer Wasserwage genau horizontal gestellt. Die zwei Röhrchen wurden in einer Entfernung von 77° symmetrisch zur vertikalen Linie so gestellt, dass die vier Plantinspitzen die Quecksilbertropfen nach einander berührten. Nachdem das Gehwerk des Klinostaten eingeschaltet war, wartete ich etwa eine Stunde, damit die Feder sich normal gegen die Belastung gespannt hätte. Dann fing ich mit den Ablesungen des Chronographen an und setzte sie so lange fort, bis

1) Der Kürze wegen erlaube ich mir die Ausdrücke „Zahn 12½" u. s. w. Die Nummern der Zähne und Stifte sind im folgenden stets mit Fig. 2 zu vergleichen.

der Charakter der Rotation sich deutlich gezeigt hatte.

Die ersten Versuche wurden mit dem originellen Exemplar des Wortmannschen Klinostaten angestelt. Anf der Achse war die Zentrierungsvorrichtung festgeschraubt, mit dem Stift nach Zahn 50 der Scheibe. Die Achse mit Zahnscheibe und Zentrierungsvorrichtung (ohne Gewicht auf dem Stift) zeigten, zwischen den zwei Nadeln gestellt, den Schwerpunkt nach Zahn 43. Es rührte dies davon her, dass die Schraube des Ringes der Vorrichtung nicht dem Stift gegenüber steht, sondern 90° davon entfernt ist. Der Schwerpunkt der Zentrierungsvorrichtung an sich liegt dadurch irgendwo zwischen Schraube und Stift, in unserem Falle zwischen Zahn 37 und 50, das ist in der Tat bei Zahn 43. Ich befestigte jetzt zwei Quetschhähne auf die Achse gegenüber Zahn 43, ungefähr in der Richtung von Zahn 18. Zwischen den zwei Nadeln gestellt zeigte die Achse jetzt noch ein ganz schwaches Übergewicht nach Zahn 50, in der Richting des Stiftes der Zentrierungsvorrichtung.

Ein Gewichtchen von 7,7 g wurde jetzt auf den Stift geschoben; das kupferne Gewichtchen war zylinderförmig und von geringer Höhe. Das Loch in dem Gewichtchen war so eng, dass die Reibung zur Befestigung genügte. Es wurde in einer Entfernung von 50 mm von der Umdrehungsachse auf den Stift gestellt. Diese Entfernung habe ich immer gemessen vom Umkreis der Achse bis an die untere Fläche des Gewichtes; der Radius der Achse war 9¼ mm, die hälbe Höhe des zylindrischen Gewicht chens 3 mm, so dass die Mitte des Gewichtchens in solchem Falle $50 + 9\frac{1}{4} + 3 = 62\frac{1}{4}$ mm von der Achsenlinie entfernt war. Die Achse wurde wieder in das Gelenk befestigt, und zeigte so, wenn sie frei vom Gehwerk gestellt wurde, ein merkbares Übergewicht nach Zahn 50. Nach einiger Zeit fing ich die Ablesungen mit der automatischen Chronographenmethode an. Wie oben gesagt,

steht der Platinstift 1 in der Mitte zwischen Zahn 12 und 13, Stift 2 bei Zahn 25, Stift 3 zwischen Zahn 37 und 38, Stift 4 bei Zahn 50. In den Tabellen bedeutet „Stift 1" die Zeit, in welcher Stift 1 vom ersten bis zum zweiten Quecksilberkontakt rotiert ist. In der Mitte dieser Zeit war also Zahn 12½ nach unten gerichtet, Zahn 25 nach rechts, Zahn 50 nach links. Der gebrauchte Chronograph zeigte Fünftel von Sekunden an. Ich liess den Klinostaten etwas schneller drehen als in den früher beschriebenen Versuchen, indem ich die Windflügel etwas verstellte.

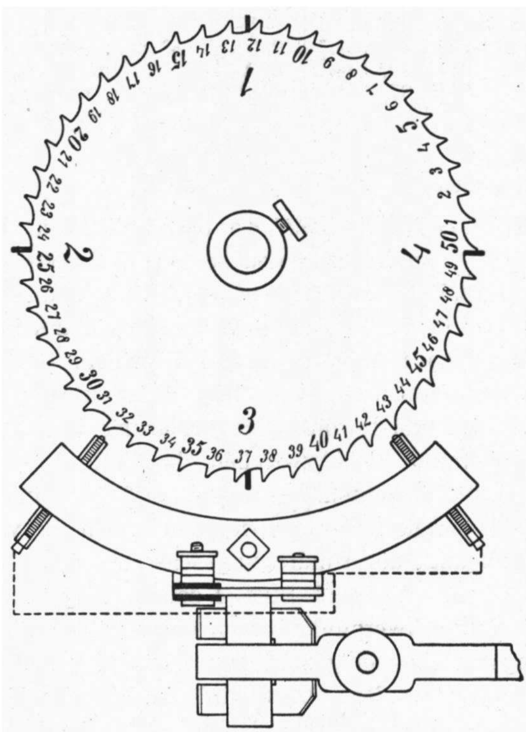


Fig. 2.

Die Zahnscheibe mit Kontaktvorrichtung für die Federklinostaten.
(½ der natürl. Grösse.)

17 April 1905.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Stift 1		$93\frac{3}{5}$	$95\frac{4}{5}$	$94\frac{2}{5}$	$95\frac{4}{5}$	93	$92\frac{4}{5}$	$96\frac{2}{5}$	$93\frac{2}{5}$	$96\frac{4}{5}$
„ 2		$93\frac{3}{5}$	$91\frac{3}{5}$	$93\frac{2}{5}$	92	89	93	$91\frac{2}{5}$	$95\frac{3}{5}$	$95\frac{2}{5}$
„ 3		$91\frac{1}{5}$	$93\frac{2}{5}$	$92\frac{4}{5}$	$89\frac{3}{5}$	$92\frac{1}{5}$	$91\frac{2}{5}$	$92\frac{4}{5}$	$95\frac{3}{5}$	$94\frac{4}{5}$
„ 4	$94\frac{4}{5}$	$92\frac{4}{5}$	$93\frac{2}{5}$	$92\frac{4}{5}$	$94\frac{2}{5}$	$91\frac{2}{5}$	$94\frac{4}{5}$	$97\frac{3}{5}$	96	96

Umdrehung.	11	12	13	im Durchschnitt.		Reihenfolge.
Stift 1	$97\frac{1}{5}$	$97\frac{2}{5}$	$96\frac{4}{5}$	$95\frac{17}{60}$	$186\frac{29}{60}$ Sek. pro Hälfte.	*d*
„ 2	$93\frac{3}{5}$	98	$94\frac{3}{5}$	$93\frac{26}{60}$		*b*
„ 3	$94\frac{1}{5}$	$93\frac{3}{5}$	95	$93\frac{3}{60}$		*a*
„ 4	$94\frac{2}{5}$	$97\frac{3}{5}$		$94\frac{40}{60}$	$189\frac{57}{60}$ Sek. pro Hälfte.	*c*

Summe der beiden Hälften $376\frac{13}{30}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $3\frac{7}{15}$ „

Die Tabelle zeigt, dass Stift 3 durchschnittlich am schnellsten, Stift 1 am langsamsten seinen Weg zwischen den beiden Kontakten zurückgelegt hat. Und in diesen Zeiträumen war in der Tat der Schwerpunkt bei Zahn 50 immer im Sinken resp. immer im Steigen begriffen.

Die Durchschnittszeit von Stift 2 ist kürzer als von Stift 4. Dies findet wohl seine Erklärung darin, dass es etwas Spielraum giebt zwischen den Zähnen des Gehwerkes des Klinostaten. Während Stift 2 seinen Weg zurücklegt, passiert der Schwerpunkt oben die vertikale Linie und fängt die Umdrehungsachse an, dem Gehwerk voranzugehen. Während Stift 4 seinen Weg zurücklegt, passiert der Schwerpunkt unten die vertikale Linie und fällt langsam ein wenig zurück um wieder vom Gehwerk geschoben zu werden. Dies wird eine geringe Beschleunigung resp. einen geringen Aufenthalt verursachen. Die Reihenfolge der Zeiträume ist also: Stift 3—2—4—1. Zur bequemeren Kontrollierung der noch folgenden Versuchs-

tabellen werde ich gleich für ein Übergewicht, je nach den 4 Richtungen der Platinstifte, die Reihenfolge der Zeitgrössen bestimmen, welche die 4 Stifte für den Weg zwischen den beiden Quecksilberkontakten brauchen. Man wird sie leicht aus der Figur 2 herleiten können.

Übergewicht ungefähr gerichtet nach:	Reihenfolge der Zeiträume vom kleinsten bis zum grössten:
Stift 1 oder Zahn 12½	Stift 4–3–1–2.
„ 2 „ „ 25	„ 1–4–2–3.
„ 3 „ „ 37½	„ 2–1–3–4.
„ 4 „ „ 50	„ 3–2–4–1.

In den Tabellen wird diese Reihenfolge angegeben durch die Buchstaben a, b, c, d, von welchen a den kleinsten, d den grössten Zeitraum andeutet.

Die Reihenfolge der Zahlengrössen bei den durchschnittlichen Werten ist nicht in jeder einzelnen Umdrehung zu erkennen. Es muss dies an der unregelmässigen Wirkung der Feder zugeschrieben werden. Bisweilen wird die Drehung verlangsamt, um später wieder plötzlich beschleunigt zu werden. Man muss daher den Durchschnitt einer grösseren Anzahl von Umdrehungen nehmen, zum Beispiel von ungefähr 10. Nach 5 Umdrehungen ergiebt der Durchschnitt jedoch meistens schon dieselbe Reihenfolge der Zahlengrössen wie nach 10. Der Durchschnitt der 2ten bis 6ten Umdrehung zeigt dies in der folgenden Tabelle.

Umdrehung.	2 bis 6 im Durchschnitt.		Reihenfolge.
Stift 1	$94\frac{13}{25}$	$187\frac{12}{25}$ „ „ „ (mit Stift 4)	*d*
„ 2	$91\frac{23}{25}$	$183\frac{19}{25}$ Sek. pro Hälfte.	*b*
„ 3	$91\frac{21}{25}$	(mit Stift 2)	*a*
„ 4	$92\frac{24}{25}$		*c*

Summe d. beiden Hälft. $371\frac{6}{25}$ Sek.
Untersch. „ „ „ $3\frac{18}{25}$ „

In den Tabellen werden immer Summe und Unterschied der beiden Hälften angedeutet. Wie früher schon erwähnt, bilden diese Zahlen ein gutes Maass für die ganze Umlaufzeit und für den Unterschied der beiden Hälften. Die wirklichen Zahlenwerte dafür können aus den angegebenen berechnet werden durch Multiplikation mit $^{90}/_{77}$, weil die Entfernung der beiden Kontakte 77° ist. Die Umlaufzeit des Versuches auf Seite 65 ist also $^{90}/_{77} \times 376^{13}/_{30} = 444^{1}/_{2}$ Sekunden.

Der Unterschied zwischen den beiden Hälften der Umdrehung ist nur $^{90}/_{77} \times 3^{7}/_{15} = 4^{1}/_{2}$ Sek. Die Umdrehungsachse war jedoch nur mit der Zahnscheibe und der Zentrierungsvorrichtung belastet, indem die Exzentrizität von einem Gewichtchen von nur 7,7 g in $62^{1}/_{2}$ mm Entfernung verursacht wurde. Bei schwererer Belastung bleiben viel grössere Übergewichte unentdeckt, und dann treten auch die grösseren periodischen Ungleichmässigkeiten von mehr als 36 Sek. ein, welche in der früher beschriebenen Versuchen gefunden wurden.

Ich schob jetzt das Gewichtchen bis auf 38 mm Entfernung von der Achse, so dass bei ausgeschaltetem Gehwerk die Umdrehungsachse kein oder fast kein Übergewicht mehr zeigte. Selbstverständlich war dieses jedoch noch immer anwesend und nach Zahn 50 gerichtet. Einige Stunden später wurde die Rotation wieder untersucht.

UMDREHUNG.	1	2	3	4	5	6	7	8
Stift 1		$118\frac{2}{5}$	$114\frac{1}{5}$	$119\frac{2}{5}$	$120\frac{3}{5}$	121	$118\frac{4}{5}$	$117\frac{2}{5}$
„ 2		$111\frac{3}{5}$	$113\frac{1}{5}$	$115\frac{3}{5}$	$114\frac{4}{5}$	$117\frac{4}{5}$	$115\frac{1}{5}$	$114\frac{1}{5}$
„ 4	$107\frac{4}{5}$	$111\frac{2}{5}$	$112\frac{1}{5}$	$113\frac{2}{4}$	$113\frac{2}{5}$	$109\frac{4}{5}$	$114\frac{1}{5}$	113
„ 3	$113\frac{4}{5}$	$112\frac{3}{5}$	116	$117\frac{2}{5}$	$114\frac{4}{5}$	$116\frac{2}{5}$	$119\frac{1}{5}$	$116\frac{3}{5}$

UMDREHUNG.	9	IM DURCHSCHNITT.	REIHENFOLGE.
Stift 1	$120\frac{3}{5}$	$118\frac{32}{40}$	*d*
„ 2	$114\frac{1}{5}$	$114\frac{23}{40}$ } $226\frac{411}{360}$ Sek. pro Hälfte	*b*
„ 3	$115\frac{2}{5}$	$112\frac{13}{45}$	*a*
„ 4	117	$115\frac{44}{45}$ } $234\frac{280}{364}$ „ „ „	*c*

Summe d. b. Hälft. $461\frac{231}{360}$ Sek.
Untersch. „ „ „ $7\frac{329}{360}$ „

Die Reihenfolge der Zahlengrössen ist wieder ganz dieselbe. Nur ist die Rotation sehr verlangsamt, und zu gleicher Zeit ist der Unterschied zwischen den beiden Hälften der Umdrehung fast verdoppelt. Die Ursache ist darin zu finden, dass die Feder schon wieder weiter abgespannt war und dadurch weniger Kraft auf das Gehwerk ausübte.

Dieser Versuch lehrt, dass ein Übergewicht, welches bei ausgeschaltetem Gehwerk nicht mehr aufzufinden ist, doch im stande ist, eine ansehnliche periodische Ungleichmässigkeit der Rotation hervorzurufen.

Das Gewichtchen wurde jetzt auf 30 mm Entfernung von der Achse geschoben, so dass bei ausgeschaltetem Gehwerk gar nichts mehr von einem Übergewicht der Umdrehungsachse zu sehen war.

18 April 1905.

Umdreh.	1	2	3	4	5	6	im Durchschnitt.		Reihenfolge.
Stift 1		$86\frac{4}{5}$	$90\frac{3}{5}$	$90\frac{1}{5}$	88	$90\frac{3}{5}$	$89\frac{6}{25}$	$173\frac{19}{30}$ Sek. pro Hälfte.	d
„ 2	$82\frac{2}{5}$	$82\frac{3}{5}$	$92\frac{2}{5}$	90	86	90	$87\frac{7}{30}$		b
„ 3	$80\frac{3}{5}$	$82\frac{2}{5}$	92	86	$87\frac{3}{5}$	$89\frac{4}{5}$	$86\frac{12}{30}$		a
„ 4	$83\frac{3}{5}$	$88\frac{3}{5}$	$90\frac{3}{5}$	$90\frac{1}{5}$	90	$91\frac{2}{5}$	$89\frac{2}{30}$	$178\frac{46}{150}$ Sek. pro Hälfte.	c

Summe der beiden Hälften $351\frac{141}{150}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $4\frac{101}{150}$ „

Diese Tabelle zeigt, dass die Rotation sehr unregelmässig war. Obwohl die Ablesungen nur eine kurze Zeit fortgesetzt wurden, bewiesen sie dass die Art der Rotation noch immer dieselbe war.

Das Gewichtchen wurde jetzt auf 20 mm Entfernung von der Achse geschoben. 19 April 1905.

Umdreh.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stift 1		$119\frac{3}{5}$	125	$123\frac{4}{5}$	$122\frac{3}{5}$	$124\frac{3}{5}$	$120\frac{3}{5}$	$125\frac{3}{5}$	$125\frac{2}{5}$
„ 2	$117\frac{3}{5}$	$120\frac{2}{5}$	120	$119\frac{2}{5}$	$122\frac{1}{5}$	$118\frac{4}{5}$	$118\frac{4}{5}$	122	$124\frac{1}{5}$
„ 3	119	$120\frac{2}{5}$	$117\frac{1}{5}$	$119\frac{3}{5}$	$117\frac{1}{5}$	$120\frac{1}{5}$	119	$120\frac{2}{5}$	122
„ 4	$123\frac{1}{5}$	$121\frac{3}{5}$	$121\frac{1}{5}$	120	$122\frac{1}{5}$	$121\frac{2}{5}$	$122\frac{2}{5}$	$126\frac{2}{5}$	125

Umdreh.	10	im Durchschnitt.		Reihenfolge.
Stift 1	$125\frac{3}{5}$	$123\frac{27}{45}$	$240\frac{25}{50}$ Sek. pro Hälfte.	d
„ 2	$123\frac{4}{5}$	$120\frac{35}{50}$		b
„ 3	123	$119\frac{40}{50}$		a
„ 4	$127\frac{2}{5}$	$123\frac{4}{50}$	$246\frac{34}{50}$ „ „ „	c

Summe d. beiden Hälft. $487\frac{9}{50}$ Sek.
Untersch. „ „ „ $6\frac{9}{50}$ „

Noch immer besteht also dieselbe Orientierung der

periodischen Ungleichmässigkeit; die Rotation war langsam, der Unterschied zwischen den beiden Hälften dadurch verhältnismässig gross.

Das Gewichtchen wurde jetzt unmittelbar gegen den Ring der Zentrierungsvorrichtung geschoben, d. h. 9 mm von der Achse entfernt.

21 April 1905.

Umdreh.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stift 1		$114\frac{1}{5}$	$116\frac{1}{5}$	$115\frac{3}{5}$	117	$114\frac{4}{5}$	117	$116\frac{4}{5}$	120
„ 2		$115\frac{3}{5}$	$112\frac{2}{5}$	$113\frac{1}{5}$	$114\frac{3}{5}$	$113\frac{2}{5}$	$115\frac{2}{5}$	115	$116\frac{1}{5}$
„ 3	$115\frac{3}{5}$	$114\frac{3}{5}$	$111\frac{4}{5}$	$114\frac{3}{5}$	$113\frac{3}{5}$	$117\frac{3}{5}$	$112\frac{3}{5}$	116	116
„ 4	$113\frac{1}{5}$	$114\frac{4}{5}$	$117\frac{4}{5}$	$113\frac{2}{5}$	$112\frac{3}{5}$	$115\frac{4}{5}$	$116\frac{2}{5}$	$119\frac{1}{5}$	$120\frac{2}{5}$

Umdreh.	10	im Durchschnitt.		Reihenfolge.
Stift 1	$118\frac{4}{5}$	$116\frac{32}{45}$	$229\frac{3}{5}$ Sek. pro Hälfte.	d
„ 2	$118\frac{1}{5}$	$114\frac{40}{45}$		b
„ 3		$114\frac{32}{45}$		a
„ 4		$115\frac{43}{45}$	$232\frac{2}{5}$ „ „ „	c

Summe d. beiden Hälft. $462\frac{4}{15}$ Sek.
Untersch. „ „ „ $3\frac{1}{15}$ „

Obwohl der Unterschied zwischen den beiden Hälften viel geringer geworden ist, ist doch die Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit noch immer dieselbe.

Jetzt wurde das Gewichtchen vom Stift entfernt. Früher war konstatiert, dass zwischen den zwei Nadeln noch ein ganz geringes Übergewicht nach Zahn 50 anwesend war. Einige Stunden nach dem Aufziehen des Gehwerkes bestimmte ich während einer langen Zeit die Art der Rotation.

22 April 1905.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Stift 1		$101\frac{1}{5}$	$99\frac{1}{5}$	$99\frac{4}{5}$	$98\frac{3}{5}$	100	$101\frac{2}{5}$	$102\frac{3}{5}$	$100\frac{2}{5}$	98
„ 2	102	$97\frac{2}{5}$	$99\frac{2}{5}$	$100\frac{4}{5}$	$100\frac{1}{5}$	102	$100\frac{2}{5}$	$100\frac{2}{5}$	$98\frac{4}{5}$	$99\frac{1}{5}$
„ 3	$97\frac{1}{5}$	$98\frac{3}{5}$	$100\frac{2}{5}$	$102\frac{4}{5}$	$98\frac{3}{5}$	102	$100\frac{1}{5}$	$100\frac{2}{5}$	$98\frac{4}{5}$	$97\frac{3}{5}$
„ 4	100	$98\frac{2}{5}$	$98\frac{1}{5}$	101	100	$98\frac{2}{5}$	$102\frac{4}{5}$	103	$97\frac{2}{5}$	$98\frac{2}{5}$

Umdrehung.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Stift 1	$100\frac{2}{5}$	99	$98\frac{3}{5}$	$97\frac{4}{5}$	$98\frac{1}{5}$	$101\frac{3}{5}$	$100\frac{3}{5}$	$101\frac{3}{5}$	101	105
„ 2	$101\frac{2}{5}$	$99\frac{2}{5}$	$98\frac{1}{5}$	100	$100\frac{4}{5}$	$100\frac{1}{5}$	$101\frac{3}{5}$	$103\frac{4}{5}$	$103\frac{3}{5}$	$104\frac{2}{5}$
„ 3	$100\frac{4}{5}$	98	$98\frac{3}{5}$	96	$100\frac{2}{5}$	$101\frac{2}{5}$	$99\frac{2}{5}$	103	$104\frac{1}{5}$	103
„ 4	102	98	$98\frac{2}{5}$	$97\frac{4}{5}$	$100\frac{4}{5}$	$102\frac{4}{5}$	$101\frac{2}{5}$	$100\frac{3}{5}$	$104\frac{2}{5}$	$106\frac{2}{5}$

Umdrehung.	21	22	23	im Durchschnitt.			Reihenf.
Stift 1	$102\frac{4}{5}$	$101\frac{4}{5}$	106	$100\frac{78}{110}$	$201\frac{80}{110}$	Sek. pro Hälfte.	*b*
„ 2	$103\frac{3}{5}$	$104\frac{4}{5}$		$101\frac{2}{110}$			*d*
„ 3	105	$103\frac{2}{5}$		$100\frac{54}{110}$	$201\frac{29}{110}$	Sek. pro Hälfte.	*a*
„ 4	$100\frac{1}{5}$	$106\frac{3}{5}$		$100\frac{85}{110}$			*c*

Summe der beiden Hälften $402\frac{109}{110}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $\frac{51}{110}$ „

Diese Tabelle zeigt keine periodische Ungleichmässigkeit, denn die Orientierung der geringen scheinbaren Periodizität schwankt je nach der Gruppe von Umdrehungen, aus welchen der Durchschnitt bestimmt wird. Der Durchschnitt der 2ten bis 11ten Umdrehung und der 12ten bis 21ten Umdrehung sind in der folgenden Tabelle berechnet.

Umdrehung.	2 bis 11 im Durchschnitt.	Reihenfolge.	12 bis 21 im Durchschnitt.	Reihenfolge.
Stift 1	$100\frac{8}{50}$ } $200\frac{4}{25}$ Sek pro	*d*	$100\frac{31}{50}$ } $202\frac{9}{50}$ Sek. pro	*a*
„ 2	100 } Hälfte.	*b*	$101\frac{28}{50}$ } Hälfte	*d*
„ 3	$100\frac{6}{50}$ } $200\frac{2}{25}$ Sek. pro	*c*	$100\frac{45}{50}$ } $201\frac{49}{50}$ Sek. pro	*b*
„ 4	$99\frac{48}{50}$ } Hälfte.	*a*	$101\frac{4}{50}$ } Hälfte.	*c*

Summe d. b. Hälften	$400\frac{6}{25}$ Sek.	$404\frac{4}{25}$ Sek.
Untersch. d. b. Hälften	$\frac{2}{25}$ „	$\frac{1}{5}$ „

Die Reihenfolge der durchschnittlichen Zeitgrössen ist hier jedesmal eine andere.

Die ursprüngliche Orientierung, wobei Stift 3 am schnellsten, Stift 1 am langsamsten die Strecke durchlief, ist also verschwunden. Ungeachtet der ansehnlichen Unregelmässigkeiten in den Zahlen der einzelnen Umdrehungen ist der Unterschied zwischen den durchschnittlichen schnellsten und langsamsten Hälften noch weniger als eine halbe Sekunde. Die äusserst geringe Exzentrizität, welche sich zwischen den zwei Nadeln verraten hatte bei der Achse ohne das Gewichtchen von 7,7 g, hat in der Rotation also keine periodische Ungleichmässigkeit verursacht.

Eine ganz genaue Zentrierung der Achse zwischen zwei Nadeln wird die Rotation nicht noch regelmässiger machen können. Denn die zwei Klemmschrauben des Gelenkes sind nicht symmetrisch angebracht, doch in einer Entfernung von 90°. Sie können an sich eine geringe Exzentrizität verursachen, welche mit der zwischen zwei Nadeln bestimmten Exzentrizität der Umdrehungsachse zusammengestellt werden muss. Behufs einer guten Zentrierung wäre es auch gewünscht, dass die Zentrierungsvorrichtung zentrisch gebaut wäre, oder dass jedenfalls ihr Schwerpunkt im Radius des Stiftes läge. Die Klemmschraube dieser Vorrichtung sollte dazu gegenüber dem Stift stehen, anstatt

90' davon entfernt. Ich habe oben erwähnt, dass diesem Übelstand abgeholfen wurde durch 2 Quetschhähne, welche in entsprechender Stellung auf die Umdrehungsachse geschraubt waren.

Die oben mitgeteilte Reihe von Versuchstabellen reicht völlig aus um uns zu zwei Schlüssen zu berechtigen:

a. Nur die exzentrische Belastung ist Ursache von der periodischen Ungleichmässigkeit der Rotation.

b. Diese Exzentrizität ist schon wirksam, wenn sie einen Betrag erreicht, der mit der gewöhnlichen Zentrierungsvorrichtung nicht aufzufinden ist und die deshalb nicht mit Hülfe dieser Vorrichtung kompensiert werden kann.

Diese Schlüsse setzen den Wert des hier untersuchten Wortmannschen Klinostaten als Hilfsmittel bei wissenschaftlichen Untersuchungen teilweise herab. Ich stelle es mir daher zur Pflicht, sie noch durch einige weitere Versuchstabellen zu begründen.

Ich behielt alle Umstände wie oben, doch stellte den Stift der Zentrierungsvorrichtung nach Zahn 25 anstatt nach Zahn 50. Auch wurden die zwei Quetschhähne ungefähr nach Zahn 40 gestellt, so dass zwischen den zwei Nadeln sich jetzt eine deutliche Spur eines Übergewichtes nach dem Stift — bei Zahn 25 — zeigte. Das Gewichtchen von 7,7 g wurde auf den Stift gegen den Ring der Zentrierungsvorrichtung geschoben. 24 April 1905.

UMDREH.	1	2	3	4	5	6	IM DURCHSCHNITT.		REIHENF.
Stift 1	$66\frac{2}{5}$	$69\frac{3}{5}$	$71\frac{3}{5}$	66	$68\frac{2}{5}$	67	$68\frac{5}{30}$		*a*
„ 2	71	$73\frac{1}{5}$	$74\frac{4}{5}$	73	$71\frac{2}{5}$	$74\frac{1}{5}$	$72\frac{28}{30}$	$146\frac{10}{30}$ Sek. pro Hälfte.	*c*
„ 3	73	$73\frac{3}{5}$	$77\frac{1}{5}$	70	$70\frac{1}{5}$	$76\frac{2}{5}$	$73\frac{12}{30}$		*d*
„ 4	$69\frac{2}{5}$	$72\frac{1}{5}$	$71\frac{3}{5}$	$66\frac{1}{5}$	$72\frac{3}{5}$	$69\frac{2}{5}$	$70\frac{7}{30}$	$138\frac{12}{30}$ Sek. pro Hälfte.	*b*

Summe der beiden Hälften $284\frac{11}{15}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $7\frac{14}{15}$ „

Der ungewöhnlich schnelle Gang ist dadurch verursacht, dass das Gehwerk ungefähr eine Stunde vorher aufgezogen war. Die periodische Ungleichmässigkeit ist jetzt anders orientiert als vorher, und zwar so wie aus der Stellung des Schwerpunktes bei Zahn 25 zu erwarten war. Die Zeit, worin Stift 1 seinen Weg zwischen den beiden Kontakten zurücklegt, ist die kürzeste und dann ist Zahn 25 stets im Sinken begriffen. Stift 3 braucht die längste Zeit und dann steigt Zahn 25 fortwährend. Stift 4 braucht weniger Zeit als Stift 2; während dieser Zeiten passiert Zahn 25 die vertikale Linie oben resp. unten, wodurch der Schwerpunkt voranzugehen beginnt resp. wieder anfängt, geschoben zu werden.

Die Orientierung der Periodizität kommt also wieder ganz überein mit der Stellung des Schwerpunktes.

Ich entfernte nun das Gewichtchen vom Stift.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7
Stift 1	$71\frac{4}{5}$	71	72	$69\frac{3}{5}$	$70\frac{4}{5}$	$69\frac{2}{5}$	$69\frac{2}{5}$
„ 2	74	$74\frac{1}{5}$	$70\frac{3}{5}$	$72\frac{3}{5}$	$74\frac{2}{5}$	$70\frac{2}{5}$	$71\frac{3}{5}$
„ 3	$74\frac{1}{5}$	$74\frac{3}{5}$	73	73	$75\frac{3}{5}$	$72\frac{4}{5}$	71
„ 4	73	$71\frac{2}{5}$	$73\frac{1}{5}$	$71\frac{1}{5}$	$71\frac{4}{5}$	70	$73\frac{2}{5}$

Umdrehung.	8	im Durchschnitt.		Reihenfolge.
Stift 1	$69\frac{3}{5}$	$70\frac{18}{40}$	$146\frac{4}{40}$ Sek. pro Hälfte.	*a*
„ 2	$71\frac{1}{5}$	$72\frac{15}{40}$		*c*
„ 3	$75\frac{3}{5}$	$73\frac{29}{40}$		*d*
„ 4	$71\frac{4}{5}$	$71\frac{39}{40}$	$142\frac{17}{40}$ Sek. pro Hälfte.	*b*

Summe der beiden Hälften $288\frac{21}{40}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $3\frac{27}{40}$ „

Die Ungleichmässigkeit ist noch genau so orientiert, nur ist ihre Grösse bis auf die Hälfte herabgesunken.

Ich war anfangs verwundert, dass die Periode sich hier deutlich zeigte, indem sie soeben im langen übereinstimmenden Versuch vom 22 April versteckt blieb. Die Erklärung ist wahrscheinlich darin zu finden, dass damals das sehr geringe Übergewicht zufälligerweise kompensiert wurde durch das Übergewicht des Gelenkes, das von den zwei Klemmschrauben verursacht wird. Ich habe leider nicht darauf geachtet, die Stellung dieser Klemmschrauben in Bezug auf die Zähne der Zahnscheibe jedesmal zu notieren.

Der Stift wurde wieder mit dem gegen den Ring geschobenen Gewichtchen versehen und nach Zahn 37 gerichtet; die Quetschhähne richtete ich ungefähr nach Zahn 8, damit der Schwerpunht in der Richtung von Zahn 37 läge.

25 April 1905.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stift 1		$94\frac{2}{5}$	$90\frac{2}{5}$	$94\frac{2}{5}$	$91\frac{1}{5}$	$91\frac{2}{5}$	$92\frac{3}{5}$	$90\frac{2}{5}$	$90\frac{2}{5}$
„ 2	$93\frac{4}{5}$	$90\frac{2}{5}$	$92\frac{2}{5}$	$93\frac{1}{5}$	$90\frac{1}{5}$	$91\frac{4}{5}$	89	89	$88\frac{2}{5}$
„ 3	$94\frac{1}{5}$	94	$93\frac{2}{5}$	$94\frac{2}{5}$	$93\frac{1}{5}$	$89\frac{2}{5}$	92	$89\frac{2}{5}$	$90\frac{2}{5}$
„ 4	$96\frac{1}{5}$	$94\frac{3}{5}$	95	$95\frac{2}{5}$	$92\frac{2}{5}$	$92\frac{3}{5}$	$92\frac{2}{5}$	93	$90\frac{4}{5}$

Umdrehung.	10	im Durchschnitt.		Reihenfolge.
Stift 1	$87\frac{4}{5}$	$91\frac{20}{45}$	$182\frac{16}{45}$ Sek. pro Hälfte.	*b*
„ 2		$90\frac{41}{45}$		*a*
„ 3		$92\frac{12}{45}$	$185\frac{39}{45}$ „ „ „	*c*
„ 4		$93\frac{27}{45}$		*d*

Summe d. beiden Hälften $368\frac{2}{9}$ Sek.
Untersch. „ „ „ $3\frac{23}{45}$ „

Die Übereinstimmung von Schwerpunktrichtung und Orientierung der Periodizität ist wieder vollkommen. Stift 2 ist der schnellste und es sinkt dann Zahn 37. Stift 4 ist der langsamste, und Zahn 37 steigt dann. Stift 1 ist kürzer als Stift 3, wie man es erwarten dürfte.

Das Gewichtchen wurde nun wieder vom Stift entfernt, so dass ein nur zwischen zwei Nadeln zu entdeckendes Übergewicht nach Zahn 37 übrig blieb. 26 April 1905.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6
Stift 1	91	$90\frac{2}{5}$	90	$89\frac{4}{5}$	$89\frac{2}{5}$	$90\frac{3}{5}$
„ 2	$88\frac{4}{5}$	$87\frac{2}{5}$	$88\frac{1}{5}$	$88\frac{4}{5}$	$91\frac{4}{5}$	$87\frac{3}{5}$
„ 3	91	$88\frac{3}{5}$	$88\frac{2}{5}$	$91\frac{3}{5}$	$89\frac{4}{5}$	$90\frac{4}{5}$
„ 4	$93\frac{1}{5}$	$87\frac{4}{5}$	$91\frac{3}{5}$	$90\frac{3}{5}$	$91\frac{1}{5}$	$93\frac{1}{5}$

Umdrehung.	7	im Durchschnitt.		Reihenf.
Stift 1	90	$90\frac{6}{35}$	$179\frac{10}{35}$ Sek. pro Hälfte.	*b*
„ 2	$91\frac{1}{5}$	$89\frac{4}{35}$		*a*
„ 3	92	$90\frac{11}{35}$	$181\frac{26}{35}$ Sek. pro Hälfte.	*c*
„ 4	$92\frac{2}{5}$	$91\frac{15}{35}$		*d*

Summe der beiden Hälften $361\frac{1}{35}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $2\frac{16}{35}$ „

Die periodische Ungleichmässigkeit ist noch genau sc orientiert wie oben, nur ist ihre Grösse wieder verringert.

Wenn für den Wortmannschen Klinostaten die Unzulänglichtkeit nun unzweideutig gezeigt worden ist, so muss auch der **Pfeffersche Klinostat** einer gleichen Prüfung unterworfen werden. Ich habe oben schon einige Versuche erwähnt welche beim Pfefferschen Klinostaten nichts besseres erwarten liessen. Es hat sich dies in den folgenden Versuchen bewährt.

Ich benutzte die langsamere der beiden Achsen, stellte den Trieb des Regulators auf den inneren Radkranz des Kronrades, stellte die Flügel halbwegs ihrer Stifte und mässig schief an die Stifte. Die Umlaufzeit war so ungefähr 12 Minuten.

Die zugehörige Umdrehungsachse ruhte genau wagerecht auf den Friktionsrollen und stand in der Verlängerung des Triebzapfens. Sie wurde nur belastet mit der Zahnscheibe und der Zentrierungsvorrichtung, deren exzentrische Klemmschrauben bei jedem Versuche so durch zwei an die Umdrehungsachse geschraubte Quetschhähne kompensiert wurden, dass ein zwischen zwei Nadeln aufzufindendes minimales Übergewicht übrig blieb in der Richtung des Stiftes der Zentrierungsvorrichtung. Auf die nicht symmetrische Stellung der beiden Klemmschrauben des Gelenkes wurde wieder nicht geachtet.

Um ein willkürlich bestimmtes Übergewicht anzubringen, wurde ein flaches zylindrisches Kupferscheibchen von 5,12 g auf den Zentrierungsstift geschoben.

Die Ablesungen geschahen wieder immer mit der automatischen Chronographenmethode; die beiden Quecksilberkontakte standen 77° von einander entfernt.

27 April 1905. Stift nach Zahn 10 gerichtet. Gewichtchen 80 mm von der Umdrehungsachse entfernt, indem sich noch gar kein Übergewicht zeigte wenn die gelockerte Achse frei im Gelenk drehen konnte. (Erst bei 110 mm Entfernung des Gewichtchens war in dieser Weise ein geringes Übergewicht nach Zahn 10 zu sehen).

UMDREH.	1	2	3	4	5	6	7	8
Stift 1	160	$162\frac{1}{5}$	$162\frac{1}{5}$	$163\frac{2}{5}$	$162\frac{4}{5}$	161	$162\frac{2}{5}$	$162\frac{2}{5}$
„ 2	$161\frac{2}{5}$	$162\frac{3}{5}$	$163\frac{3}{5}$	$163\frac{4}{5}$	$163\frac{1}{5}$	$161\frac{2}{5}$	$164\frac{2}{5}$	$164\frac{3}{5}$
„ 3	160	$161\frac{2}{5}$	$162\frac{1}{5}$	163	$162\frac{1}{5}$	$161\frac{4}{5}$	163	$163\frac{1}{5}$
„ 4	$159\frac{4}{5}$	$161\frac{2}{5}$	$161\frac{4}{5}$	$160\frac{2}{5}$	$159\frac{1}{5}$	160	$161\frac{2}{5}$	161

Umdreh.	9	10	im Durchschnitt.		Reihenf.
Stift 1	163	$165\frac{2}{5}$	$162\frac{24}{50}$		*c*
„ 2	$165\frac{2}{5}$	$167\frac{2}{5}$	$163\frac{39}{50}$	$326\frac{10}{50}$ Sek. pro Hälfte.	*d*
„ 3	$163\frac{3}{5}$	$163\frac{4}{5}$	$162\frac{21}{50}$		*b*
„ 4	$162\frac{3}{5}$	162	$160\frac{48}{50}$	$323\frac{22}{50}$ „ „ „	*a*

Summe der beiden Hälften $649\frac{16}{25}$ Sek.
Untersch. „ „ „ $2\frac{19}{25}$ „

Stift 4 lief am schnellsten, Stift 2 am langsamsten, indem Stift 3 weniger Zeit brauchte als Stift 1; es stimmt dies wieder ganz überein mit dem zwischen zwei Nadeln gezeigten Übergewicht nach Zahn 10.

28 April 1905. Das Gewichtchen wurde jetzt vom Stift entfernt, übrigens alles wie oben.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7
Stift 1	$176\frac{2}{5}$	$180\frac{2}{5}$	$179\frac{1}{5}$	$183\frac{4}{5}$	$180\frac{1}{5}$	$181\frac{3}{5}$	$182\frac{4}{5}$
„ 2	$178\frac{1}{5}$	183	$180\frac{4}{5}$	$185\frac{1}{5}$	$181\frac{3}{5}$	$182\frac{1}{5}$	$183\frac{1}{5}$
„ 3	$179\frac{3}{5}$	180	$180\frac{4}{5}$	$179\frac{2}{5}$	182	$181\frac{4}{5}$	$182\frac{4}{5}$
„ 4	$179\frac{1}{5}$	$177\frac{3}{5}$	$181\frac{1}{5}$	$178\frac{1}{5}$	$182\frac{3}{5}$	$181\frac{2}{5}$	$183\frac{2}{5}$

Umdrehung.	8	im Durchschnitt.		Reihenf.
Stift 1	$181\frac{1}{5}$	$180\frac{28}{40}$		*c*
„ 2	178	$181\frac{21}{40}$	362 Sek. pro Hälfte.	*d*
„ 3	$177\frac{2}{5}$	$180\frac{19}{40}$		*b*
„ 4	$177\frac{2}{5}$	$180\frac{5}{40}$	$360\frac{38}{40}$ Sek. pro Hälfte.	*a*

Summe der beiden Hälften $722\frac{38}{40}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $1\frac{17}{40}$ „

Die langsamere Rotation war dadurch verursacht, dass mehr Zeit verlaufen war seit dem Aufziehen der Feder.

Die Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit ist noch wie oben, nur die Grösse ist verringert.

Jetzt wurde der Stift wieder mit dem Gewichtchen von 5,12 g in einer Entfernung von 80 mm von der Achse versehen und nach Zahn 48 gerichtet, mit entsprechender Verteilung der Quetschhähne. 29 April 1905.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8
Stift 1	$174\frac{4}{5}$	$169\frac{4}{5}$	$169\frac{2}{5}$	$169\frac{3}{5}$	$170\frac{4}{5}$	$170\frac{2}{5}$	$171\frac{3}{5}$	171
„ 2	$170\frac{1}{5}$	$168\frac{3}{5}$	$166\frac{3}{5}$	$167\frac{2}{5}$	168	$168\frac{1}{5}$	169	$167\frac{1}{5}$
„ 3	$167\frac{2}{5}$	166	$165\frac{2}{5}$	167	$166\frac{4}{5}$	$167\frac{3}{5}$	$167\frac{2}{5}$	$164\frac{4}{5}$
„ 4	$168\frac{4}{5}$	$168\frac{2}{5}$	$168\frac{4}{5}$	$168\frac{4}{5}$	$168\frac{4}{5}$	$169\frac{1}{5}$	$169\frac{1}{5}$	$166\frac{4}{5}$

Umdrehung.	9	im Durchschnitt.		Reihenf.
Stift 1	$169\frac{1}{5}$	$170\frac{38}{45}$	$334\frac{10}{45}$ Sek. pro Hälfte.	*d*
„ 2	$166\frac{2}{5}$	$167\frac{43}{45}$		*b*
„ 3	164	$166\frac{12}{45}$		*a*
„ 4	$166\frac{4}{5}$	$108\frac{18}{45}$	$339\frac{6}{45}$ „ „ „	*c*

Summe der beiden Hälften $673\frac{16}{45}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $4\frac{41}{45}$ „

Stift 3 legte seinen Weg am schnellsten zurück, Stift 1 am langsamsten, und 4 schneller als 2; dies stimmt wieder genau überein mit dem nur zwischen den zwei Nadeln aufzufindenden Übergewicht nach Zahn 48.

Ich habe es nützlich geurteilt, auch die schnellst drehende Achse des Pfefferschen Klinostaten zu untersuchen in Bezug auf die Gleichmässigkeit ihrer Rotation. Es wäre ja möglich, dass die periodische Umgleichmässigkeit bei schneller Rotation verschwände oder doch kaum nachweisbar würde. Ich musste hierzu den dritten Kontakt herstellen, der auf Seite 222 beschrieben wurde und der den Chronographen automatisch wieder auf Null

stellte, kurz bevor der nächstfolgende Stift den ersten der drei Kontakte berührte. Den grössten Teil der 90°—77° = 13° einer Viertelumdrehung behielt ich also noch um die Stellung des Sekundenzeigers abzulesen.

Die schnelle Umdrehung dauerte etwas mehr als eine Minute. Die Zeit, in welcher man die Stellung des Zeigers ablesen musste, betrug 1½ Sekunde. Ich war also verpflichtet, die Aufmerksamkeit fortwährend gespannt zu halten. Die erheischten 10 oder 15 Umdrehungen dauerten jedoch zusammen nur eine Viertelstunde, so dass die ermüdende Arbeit nicht zu lange nötig war.

Die schnelle Achse des Pfefferschen Klinostaten dreht in entgegengesetzter Richtung von derjenigen der langsamen Achse. Die Zahnscheibe wurde jedoch in ganz derselben Stellung an der Umdrehungsachse befestigt gelassen, so dass jetzt dem Stift 1 Stift 4 folgte, dann Stift 3, dann Stift 2. „Stift 1" bedeutet wieder die Zeit, worin Stift 1 vom ersten Kontakt bis zum zweiten rotiert, was jetzt von links nach rechts stattfindet.

Die Reihenfolge der 4 Zeiträume bei einem Übergewicht resp. nach den 4 Richtungen der 4 Platinstifte ist jetzt derjenigen entgegengesetzt, welche auf Seite 235 angegeben wurde, also wie in der folgenden Tabelle.

Übergewicht ungefähr gerichtet nach:	Reihenfolge der Zeiträume vom kleinsten bis zum grössten:
Stift 1 oder Zahn 12½	Stift 2—1—3—4
„ 2 „ „ 25	„ 3—2—4—1
„ 3 „ „ 37½	„ 4—3—1—2
„ 4 „ „ 50	„ 1—4—2—3

Ich liess die Achse nun erst so belastet wie beim vorigen Versuch, d. h. mit dem Stift nach Zahn 48 und mit dem Gewichtchen von 5,12 g 80 mm von der Achse entfernt.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Stift 4	12	$13\frac{2}{5}$	$12\frac{1}{5}$	$12\frac{4}{5}$	$13\frac{1}{5}$	$12\frac{3}{5}$	$12\frac{3}{5}$	$13\frac{1}{5}$	$12\frac{3}{5}$	$12\frac{3}{5}$	$13\frac{1}{5}$
„ 3	$14\frac{3}{5}$	$14\frac{4}{5}$	$15\frac{1}{5}$	$15\frac{2}{5}$	$14\frac{3}{5}$	$15\frac{2}{5}$	$16\frac{1}{5}$	15	$15\frac{2}{5}$	$15\frac{4}{5}$	$15\frac{1}{5}$
„ 2	$14\frac{3}{5}$	$14\frac{1}{5}$	$15\frac{2}{5}$	14	$14\frac{4}{5}$	16	$14\frac{3}{5}$	$14\frac{3}{5}$	$16\frac{1}{5}$	15	$14\frac{2}{5}$
„ 1	$11\frac{4}{5}$	$12\frac{3}{5}$	$12\frac{3}{5}$	$12\frac{4}{5}$	$12\frac{4}{5}$	$12\frac{1}{5}$	$12\frac{4}{5}$	12	$12\frac{2}{5}$	$12\frac{2}{5}$	13

Umdrehung.	12	13	14	im Durchschnitt.		Reihenf.
Stift 4	$13\frac{1}{5}$	$13\frac{1}{5}$	$13\frac{4}{5}$	$12\frac{63}{70}$	$30\frac{5}{14}$ Sek. pro Hälfte.	*b*
„ 3	$15\frac{3}{5}$	$16\frac{2}{5}$	$15\frac{2}{5}$	$15\frac{25}{70}$		*d*
„ 2	$15\frac{4}{5}$	$15\frac{2}{5}$	15	15		*c*
„ 1	$12\frac{2}{5}$	$12\frac{2}{5}$	$13\frac{1}{5}$	$12\frac{37}{70}$	$25\frac{6}{14}$ Sek. pro Hälfte.	*a*

Summe der beiden Hälften $55\frac{11}{14}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $4\frac{13}{14}$ „

Die Tabelle zeigt, dass die periodische Ungleichmässigkeit unerwartet gross ist. Ihre absolute Grösse ist ungefähr wie bei der langsamen Achse; ihre prozentische Grösse ist hier somit sehr viel bedeutender. Ausserdem sind die individuellen Abweichungen in den einzelnen Umdrehungen so gering, dass die Reihenfolge der Zeitgrössen in den einzelnen Umdrehungen fast immer dieselbe ist wie in den durchschnittlichen Zeiten der 4 Stifte. Diese Reihenfolge ist Stift 1—4—2—3, was gerade übereinstimmt mit dem vorhandenen kleinen Übergewicht nach Zahn 48.

Ich richtete jetzt den Stift mit dem Gewichtchen nach Zahn 23, mit entsprechender Verstellung der Quetschhähne.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stift 4		14	$14\frac{1}{5}$	14	$15\frac{2}{5}$	$14\frac{2}{5}$	$14\frac{2}{5}$	15	$14\frac{1}{5}$
„ 3		$12\frac{3}{5}$	$12\frac{2}{5}$	$12\frac{4}{5}$	$12\frac{4}{5}$	$12\frac{3}{5}$	$12\frac{4}{5}$	$12\frac{2}{5}$	$12\frac{3}{5}$
„ 2		$12\frac{3}{5}$	$13\frac{3}{5}$	$13\frac{1}{5}$	$13\frac{2}{5}$	$13\frac{4}{5}$	14	$13\frac{1}{5}$	14
„ 1	$14\frac{1}{5}$	$15\frac{3}{5}$	$15\frac{2}{5}$	$14\frac{4}{5}$	$15\frac{2}{5}$	$14\frac{3}{5}$	$15\frac{3}{5}$	$16\frac{1}{5}$	$15\frac{1}{5}$

Umdrehung.	10	im Durchschnitt.	Reihenf.
Stift 4	$14\frac{4}{5}$	$14\frac{22}{45}$	*c*
„ 3	$13\frac{1}{5}$	$12\frac{31}{45}$ } $26\frac{5}{45}$ Sek. pro Hälfte.	*a*
„ 2	13	$13\frac{19}{45}$	*b*
„ 1		$15\frac{10}{45}$ } $29\frac{32}{45}$ „ „ „	*d*

Summe der beiden Hälften $55\frac{37}{45}$ Sek.
Unterscheid „ „ „ $3\frac{3}{5}$ „

Die Tabelle verhält sich genau wie die vorige, nur ist die Reihenfolge die umgekehrte: Stift 3—2—4—1. Dies stimmt völlig überein mit dem Übergewicht nach Zahn 23.

Jetzt stellte ich das Gewichtchen von 5,12 g in einer Entfernung von 40 mm anstatt von 80 mm von der Achse.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stift 4	$14\frac{3}{5}$	$13\frac{3}{5}$	$13\frac{1}{5}$	15	$14\frac{1}{5}$	$13\frac{4}{5}$	$14\frac{4}{5}$	$13\frac{4}{5}$	$13\frac{4}{5}$
„ 3	$12\frac{4}{5}$	$12\frac{4}{5}$	$13\frac{2}{5}$	$13\frac{2}{5}$	13	14	13	$12\frac{3}{5}$	13
„ 2	$12\frac{4}{5}$	14	14	$13\frac{4}{5}$	$14\frac{4}{5}$	$13\frac{2}{5}$	$13\frac{3}{5}$	$14\frac{1}{5}$	$13\frac{2}{5}$
„ 1	15	$14\frac{1}{5}$	$14\frac{4}{5}$	$15\frac{3}{5}$	15	14	$15\frac{3}{5}$	$14\frac{3}{5}$	$14\frac{3}{5}$

Umdrehung.	10	im Durchschnitt.	Reihenf.
Stift 4	$13\frac{4}{5}$	$14\frac{3}{50}$	*c*
„ 3	13	$13\frac{6}{50}$ } $26\frac{43}{50}$ Sek. pro Hälfte.	*a*
„ 2	$13\frac{2}{5}$	$13\frac{37}{50}$	*b*
„ 1	$14\frac{4}{5}$	$14\frac{41}{50}$ } $28\frac{44}{50}$ „ „ „	*d*

Summe der beiden Hälften $55\frac{37}{50}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $2\frac{1}{50}$ „

Die periodische Ungleichmässigkeit hat also ihre Orientierung beibehalten, nur ist ihre Grösse bedeutend herabgesunken.

Diese Versuchsreihen zeigen, dass die mit der gewöhnlichen Zentrierungsvorrichtung ganz

unentdeckbaren kleinen Übergewichte auch bei dem Pfefferschen Klinostaten eine starke periodische Ungleichmässigkeit der Rotation hervorzurufen im stande sind.

Bei der schnellen Achse erreicht diese Ungleichmässigkeit eine Grösse von mehreren Prozenten. Dass ein kleines Übergewicht die schnelle Achse stärker affiziert, ist aus der Konstruktion des Gehwerkes des Klinostaten leicht abzuleiten. Die schnelle Achse ist durch ein Getriebe mehr von der Feder getrennt als die langsame Achse, und die Kraft des Übergewichtes wirkt bei der schnellen Achse also mit einem viel grösseren Momente als bei der langsamen. Es ist dies wiederum ein neuer Beweis für die Tatsache, dass nur die exzentrische Belastung Ursache ist von der periodischen Ungleichmässigkeit der Rotation.

Die von einer Feder getriebenen Klinostaten haben sich bei horizontaler Achse als unzulänglich hingestellt. Wie die Motorklinostaten sich in dieser Hinsicht verhalten, darüber werden die jetzt folgenden Versuche Aufschluss geben.

Ich hatte nur den grossen Motorklinostaten zu meiner Verfügung, der nach den Angaben von Prof. J. W. Moll konstruiert worden war. Weil die anderen Motorklinostaten erhebliche Unterschiede in ihrer Konstruktion zeigen, sind die erhaltenen Resultate nicht ohne weiteres auf sie zu übertragen. Ich werde daher besonders hervorheben, welche Schlüsse auch für sie von Gültigkeit sind.

Die Oberfläche und der Umkreis der grossen gusseisernen Scheibe des Mollschen Klinostaten sind auf der Drehbank abgedreht worden. Es fiel dadurch leicht, den Umkreis genau in vier gleiche Teile zu verteilen. An diese Stellen wurden vier 2 mm dicke Kupferstifte in ein in radikaler Richtung eingebohrtes Loch befestigt. Die vier Stifte

wurden so abgefeilt, dass sie genau dieselbe Länge erhielten. Sie wurden in solcher Weise numeriert, dass sie in der Reihenfolge 1—2—3—4 einen fest stehenden Punkt passierten.

In der horizontalen Ebene, in welcher die Achse der Scheibe sich befand, stellte ich rechts ein Stück einer 5 mm breiten Uhrfeder, das in einem Stativ befestigt war. Das Stück ragte ungefähr 8 cm aus der Stativklemme hervor. Es wurde derart gestellt, dass es von den 4 Stiften berührt wurde ohne der Rotation einen merkbaren Widerstand zu leisten. Es wurde daher zwischen radial und tangential gerichtet nach der Seite, nach welcher die Stifte sich entfernten. Diese Stellung ist bei den Federn in Fig. 3 zu beobachten. Die Kontakte schlossen den Strom eines

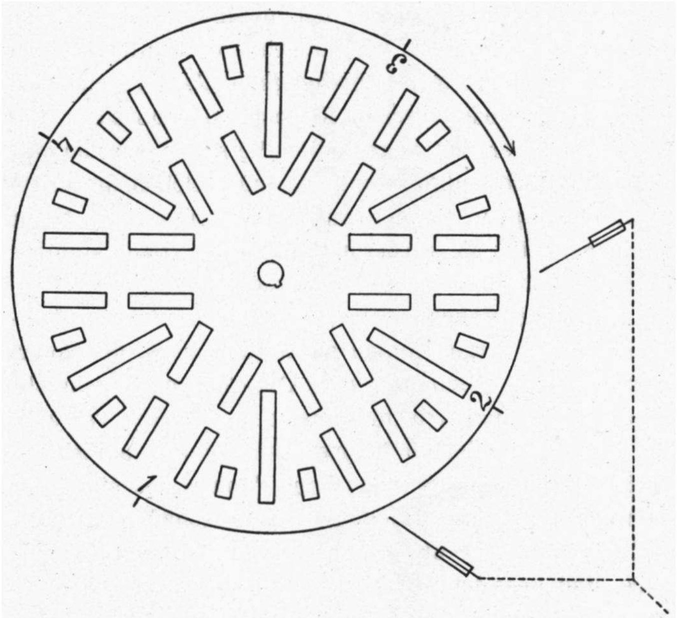


Fig. 3. Die Kontaktvorrichtung an der grossen Scheibe des Motorklinostaten. ($^1/_{10}$ der natürl. Grösse.)

Leclanché-Elementes, der dann eine elektrische Klingel ertönen machte.

So lange ich die Rotation bestimmte mit dem grossen Sekundenzeiger der früher beschriebenen Weckeruhr, oder mit zwei Chronographen, genügte der eine genannte Federkontakt. Später wurden die Zeiten mit nur einem Chronographen bestimmt, welcher wieder automatisch von zwei Kontakten durch einen Elektromagnet in Gang gesetzt und gehemmt wurde; also durch die automatische Chronographenmethode. Für den anderen Kontakt war ein zweites Stück Uhrfeder rechts unter der Scheibenachse gestellt, 65° von der ersten Feder entfernt, wie Fig. 3 angiebt. Die 65 Grade lieferten wieder das Maass für die Schnelligkeit einer Viertelumdrehung. Ich konnte dafür keinen viel grösseren Teil eines Quadranten nehmen, weil ich eine Rotationsgeschwindigkeit von ungefähr 6 Minuten wählte, d. i. etwa die doppelte Geschwindigkeit als die welche ich bei dem W o r t m a n n schen Klinostaten benutzte.

Die in späterer Zeit angestellten Versuche wurden mit drei Kontaktfedern unternommen, von welchen die dritte den Chronographen wieder auf Null stellte, kurz bevor der folgende Stift sie wieder in Gang setzte. Dann konnten 80° eines Quadranten bestimmt werden.

Die Ablesung brauchte selbstverständlich nicht in demselben Zimmer vorgenommen zu werden als wo der Motorklinostat stand, wenn nur eine Drahtleitung angebracht wurde, welche die Arbeitsräume mit einander verband. Auch konnte ich hier die Wippe — als Relais — entbehren, weil die Federkontakte von dem Funken des stärkeren Akkumulatorenstromes nicht zu sehr beschädigt wurden.

Ich gebrauchte die obere Achse mit der grossen Riemenscheibe, und liess den Anlassrheostat im Stromkreis stehen. So wurde die Umlaufzeit von ungefähr 6 Minuten erhalten, wodurch ich in nicht zu langer Zeit eine genügend lange Versuchsreihe ablesen konnte.

Es konnte die Belastung kaum in Betracht kommen in Vergleichung mit dem Gewicht der grossen Scheibe von 39 kg. Sie bestand meistens aus 4 angeschraubten Eisenstäben, welche zur Befestigung der zu rotierenden Pflanzen dienen sollten; und aus einem sehr kurzen Stabe, worauf das Zinkblechkistchen mit feuchten Sägespänen festgeschraubt wurde. Die 4 längeren Stäbe waren symmetrisch über die Scheibe verteilt; der kurze Stab mit dem Kistchen war nicht zentrisch befestigt, doch stand er dem Mittelpunkt der Scheibe so nahe wie möglich, an der Seite des Kontaktstiftes 3.

Die Ursachen, welche Ungleichmässigkeiten in der Rotation verursachen könnten, sind hier etwa die folgenden:

1. Der Elektromotor läuft nicht immer mit derselben Schnelligkeit, es sei durch Schwankungen der Stromstärke, es sei durch innere Urachen des Motors.

2. Der Transmissionsriemen kann durch zu geringe Spannung mehr oder weniger über die Riemenscheiben gleiten.

3. Die Reibung in den Getrieben kann ungleichmässig sein.

4. Bei einer exzentrischen Belastung kann der Spielraum im Eingriff der Zähne des Gehwerkes verursachen, dass die Umdrehungsachse abwechselnd dem Gehwerk vorangeht oder vom Gehwerk geschoben wird.

5. Eine exzentrische Belastung kann in den beiden Hälften einer Umdrehung, worin der Schwerpunkt fällt resp. steigt, den Lauf des Motors abwechselnd beschleunigen resp. verlangsamen.

Die erstgenannte Ursache ist deutlich zu erkennen in den zu erwähnenden Versuchstabellen. Sie verursacht jedoch keine periodische Ungleichmässigkeit während einer Umdrehung.

Die zweite Ursache wird eine periodische Ungleichmässigkeit veranlassen können, sobald das Übergewicht

der Last einen gewissen Betrag übersteigt. Sie ist zumal bei denjenigen Motorklinostaten zu befürchten, welche eine Riementransmission haben an einer langsam drehenden, weit vom Motor entfernten Achse.

Die dritte Ursache kann wirksam sein, wo der Eingriff der Zähne durch ungenaue Bearbeitung der Maschinenteile nicht allseitig gleich ist. Sie wirkt zwar periodisch, doch stimmt die Periode meistens nicht überein mit der Umlaufzeit des Klinostaten und ist sie dadurch weniger schädlich. Nur wenn eine periodische Reibung an der Umdrehungsachse vorhanden ist, wie bei unserem Instrumente der Fall war, wird dieser Einfluss störend wirken.

Die vierte und fünfte Ursache haben sich in meinen Versuchen als verhängnisvoll für eine gute Wirkung herausgestellt. Die von ihnen veranlasste Ungleichmässigkeit fällt immer periodisch zusammen mit der Umlaufzeit der Umdrehungsachse.

In den Versuchstabellen werden die vier Quadranten einer Umdrehung wieder angedeutet als Stift 1, 2, 3 und 4. Bei den Ablesungen mit der Weckeruhr oder mit der einfachen Chronographenmethode bedeutet Stift 1 die Zeit, welche verläuft zwischen dem Kontakt von Stift 1 und dem Kontakt von Stift 2 mit der Feder, welche rechts in der horizontalen Ebene durch die Achse stand. Bei der automatischen Chronographenmethode bedeutet Stift 1 die Zeit, welche verläuft zwischen dem Kontakt von Stift 1 mit der ersten rechts gestellten Feder und mit der zweiten tiefer gestellten. In beiden Fällen wird durch „Stift 1" also derselbe Quadrant angedeutet.

Nachdem der Stromkreis des Motors geschlossen war, konnte ich noch nicht gleich mit den Ablesungen anfangen. Die Geschwindigkeit des Klinostaten war anfangs viel geringer und steigerte sich in den erstfolgenden Umdrehungen bedeutend, wie aus folgendem Beispiel ersichtlich.

18 Januar 1905.

Umdrehung.	1	2	3	4	.....	11	
Stift 1	112	105 1/4	96 2/4	92 1/4	.....	86	Sek.
„ 2	109 2/4	97	101 2/4	93 3/4	.....	87 3/4	„
„ 3	98 1/4	96	99 1/4	91 1/4	.....	86 1/4	„
„ 4	101 1/4	96	97 3/4	89	.....	85 2/4	„

Die Zunahne der Geschwindigkeit dauert mehr als eine halbe Stunde. Nach einer Stunde ist immer die normale Grösse erreicht, so dass man nicht eher mit der Bestimmung der Gleichmässigkeit anfangen soll.

Eines Tages als der Klinostat lange rotiert hatte, hielt ich ihn während 2 Minuten an. Die Geschwindigkeit wurde sogleich bevor und nach der Ruhepause bestimmt und es stellte sich heraus, dass sie ganz dieselbe geblieben war. Wahrscheinlich gerät mithin der rotierende Motor im Anfang in einen Zustand, zum Beispiel durch innere Temperaturerhöhung, welcher die Geschwindigkeit des Motors beeinflusst und sich nicht während der kurzen Ruhepause wieder ausgleicht. Auch könnte die Ursache im Schmierungszustand des Gehwerkes des Klinostaten liegen.

Schon bei den ersten Versuchen erfuhr ich, dass die Rotation auch später nicht ganz gleichmässig wurde. In den meisten Fällen war die Zeit von Stift 2 länger als die anderen Zeiten, wodurch eine Periodizität der Ungleichmässigkeit bedingt war. Ich führe folgendes Beispiel an.

5 Januar 1905. Der Klinostat hatte seit dem vorigen Tage gelaufen. Ablesung mit dem grossen Sekundenzeiger der Weckeruhr.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	im Durchschnitt.	
Stift 1	88	88	88	88	87	89	89	$88\frac{1}{7}$	$177\frac{4}{7}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	89	88	89	90	90	90	90	$89\frac{3}{7}$	
„ 3	87	87	88	87	88	88	89	$87\frac{5}{7}$	$176\frac{2}{7}$ Sek. pro Hälfte.
„ 4	88	89	89	89	89	88	88	$88\frac{4}{7}$	

Summe der beiden Hälften $353\frac{6}{7}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $1\frac{2}{7}$ „

Die Tabelle zeigt, dass die Rotation ziemlich gleichmässig ist. Die periodische Ungleichmässigkeit ist zwar gering, doch ist sie fast in jeder einzelnen Umdrehung zu erkennen. Anfänglich dachte ich, die so geringen Unterschiede den verschiedenen Entfernungen der 4 Kupferstifte zuschreiben zu müssen. Durch wiederholte Messung überzeugte ich mich, dass diese Entfernung bis auf einen Teil eines Millimeters dieselbe war, und 558 mm betrug. 1 mm ist weniger als 0,2 % von 558 mm; und 1 Sekunde ist mehr als 1 % von 89 Sekunden, so dass die Zeitunterschiede pro Quadrant weit grösser sind als die eventuellen Unterschiede in der Entfernung der Stifte.

Ich überzeugte mich nun zuerst davon, dass eine exzentrische Belastung grössere periodische Ungleichmässigkeiten hervorzurufen im stande war. Zwischen Stift 1 und 2 befestigte ich ein eisernes Gewicht von 4 kg an die Scheibe, nicht weit vom Umkreis entfernt. Zu gleicher Zeit hatte ich zwei Kistchen mit Sägespänen und Keimlingen an die Scheibe befestigt, deren geringes Gewicht nur sehr wenig Einfluss haben konnte wegen ihrer symmetrischen Befestigung.

11 Januar 1905. Der Klinostat hatte seit dem vorigen Tage gelaufen. Ablesung mit der einfachen Chronographenmethode.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	im Durchschnitt.	
Stift 1	$80\frac{2}{4}$	$80\frac{1}{4}$	$79\frac{3}{4}$	$79\frac{1}{4}$	$76\frac{1}{4}$	$79\frac{4}{20}$	} $167\frac{5}{20}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	86	$86\frac{1}{4}$	$84\frac{3}{4}$	84	$84\frac{3}{4}$	$85\frac{3}{20}$	
„ 3	83	$82\frac{3}{4}$	$82\frac{2}{4}$	82	$80\frac{1}{4}$	$82\frac{2}{20}$	} $156\frac{1}{20}$ „ „ „
„ 4	$76\frac{2}{4}$	$76\frac{2}{4}$	$76\frac{1}{4}$	79	76	$76\frac{17}{20}$	

Summe der beiden Hälften $323\frac{8}{10}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $11\frac{1}{5}$ „

Diese Tabelle zeigt eine viel grössere periodische Ungleichmässigkeit, welche vom starken Übergewicht verursacht wurde. Wenn das Übergewicht zwischen Stift 1 und 2 oben beinahe 45° weiter als die vertikale Linie gedreht war, sah ich jedesmal die Scheibe um einen kleinen Betrag fallen. Wenn dagegen das Übergewicht unten nach links gekommen war, blieb die Scheibe einen kurzen Augenblick stillstehen. Der Raum im Eingriff der Zähne verursachte hier also, dass das Übergewicht eine ansehnliche periodische Ungleichmässigkeit hervorrufen konnte.

Weil die Kontaktfeder rechts in der durch die Achse gehenden horizontalen Ebene stand, war die Beschleunigung durch das Fallen des Übergewichtes in der für Stift 4 angegeben Zeit begriffen, welche sich in der Tabelle als die kürzeste herausstellt. Stift 2 gebraucht die längste Zeit wegen des Stillstehens der Scheibe links unten.

Der Übergang von der 4ten in die 5te Umdrehung der Tabelle zeigt eine Abweichung. Die Grössenverhältnisse von Stift 4 und 1 sind hier gerade umgekehrt und ich sah, dass der Fall der Scheibe sich hier etwas verzögert hatte und eintrat als Stift 1 gerade die Kontaktfeder passiert hatte. Die Beschleunigung gehörte hier also zu der Zeit von Stift 1. Diese Abweichung zeigt, dass individuelle Differenzen in den Umdrehungen auch hier vorkommen, obwohl im allgemeinen die einzelnen Umdrehungen dieselbe

Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit zeigen als die durchschnittlichen Zahlenwerte.

Der Raum im Eingriff der Zähne ist nicht die einzige Ursache, welche dem Übergewicht einen so grossen Einfluss verleiht. Es beweisen dies die Zeiten für Stift 1 und 3, welche gleich lang hätten sein sollen, wenn der Lauf des Motors nicht vom Übergewicht beeinflusst worden wäre. Stift 1 braucht im Durchschnitt eine mehr als 2 Sekunden kürzere Zeit als Stift 3, und in diesen Zeiten senkt dass Übergewicht sich resp. steigt es.

Der in diesem Klinostaten gebrauchte Motor ist sehr kräftig, wie im vorigen Kapitel erwähnt wurde. Er rotiert mit Leichtigkeit die schwersten Lasten, welche jedoch schwierig genau zu äquilibrieren waren. Wenn dieser starke Motor schon in dieser Weise beeinflusst wird von einem Übergewicht von 4 kg auf der 39 kg schweren Scheibe, können wir nicht erwarten, dass die anderen Motorklinostaten in dieser Hinsicht besseres leisten würden.

Ich lasse erst noch eine Versuchstabelle folgen, welche den Einfluss eines Übergewichtes demonstriert und bei welcher ein Gewicht von 2 kg an einer anderen Stelle auf der Scheibe befestigt war als zwischen Stift 1 und 2. Ich habe diesen Versuch vor kurzem noch einmal angestellt, weil bei dem vorigen Versuch das Übergewicht zufälligerweise in der Richtung zwischen Stift 1 und 2 lag und die Zeit von Stift 2 auch in fast allen anderen Versuchen die längste war. Es ist hier die automatische Chronographenmethode benutzt worden mit 3 Kontakten, wobei 80° eines Quadranten gemessen wurden. Die Kontakte standen wie früher, so dass Stift 1 u. s. w. die nämlichen Zeiten andeuten.

4 Februar 1907. Scheibe nahe am Umkreis zwischen Stift 2 und 3 belastet mit einem Gewicht von 4 kg.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7
Stift 1	97	$99\frac{2}{4}$	$104\frac{2}{4}$	$106\frac{1}{4}$	$103\frac{2}{4}$	$101\frac{3}{4}$	$108\frac{2}{4}$
„ 2	100	$102\frac{1}{4}$	104	107	$103\frac{2}{4}$	103	$109\frac{2}{4}$
„ 3	100	102	$105\frac{3}{4}$	$106\frac{2}{4}$	$103\frac{3}{4}$	$104\frac{3}{4}$	$111\frac{1}{4}$
„ 4	102	$106\frac{3}{4}$	$108\frac{1}{4}$	$107\frac{3}{4}$	$104\frac{2}{4}$	$109\frac{2}{4}$	$113\frac{3}{4}$

Umdrehung.	8	9	im Durchschnitt.	
Stift 1	$108\frac{3}{4}$	$111\frac{3}{4}$	$104\frac{22}{36}$	$210\frac{9}{36}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	110	$111\frac{2}{4}$	$105\frac{23}{36}$	
„ 3	113	112	$106\frac{20}{36}$	$215\frac{17}{36}$ „ „ „
„ 4	$115\frac{2}{4}$	$112\frac{1}{4}$	$108\frac{33}{36}$	

Summe der beiden Hälften $425\frac{13}{18}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $5\frac{2}{9}$ „

Die Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit ist laut der Tabelle eine ganz andere geworden, und sie stimmt mit der veränderten Richtung des Übergewichtes überein. Die Zeit für Stift 4 ist die längste, weil das Übergewicht dann fortwährend steigt. Die Zeit für Stift 3 ist lang, weil das Übergewicht dann den unteren senkrechten Radius überschreitet. Die Zeiten für Stift 1 und 2 sind die kürzesten, weil das Übergewicht dann den oberen senkrechten Radius überschreitet resp. sich fortwährend senkt.

In dieser Versuchstabelle ist eine Verlangsamung der Rotation zu sehen, welche den Charakter der periodischen Ungleichmässigkeit nur sehr wenig ändert, weil sie alle Quadranten ungefähr in demselben Maasse verlängert. Indem ich die Ablesungen fortsetzte, zeigte es sich dass eine solche Verlangsamung mit dem Schmierungszustand der Zapfen u. s. w. des Gehwerkes zusammenhängen kann. Die nächstfolgenden Umdrehungen ergaben:

Umdrehung.	10	11	12	13	14
Stift 1	110¾	118	119¼	111 2/4	88¼
„ 2	111¾	118¾	119	98	87¾
„ 3	115¾	120	116¾	92¼	89¼
„ 4	119	122	107¼	91 2/4	91¼

Während der zwölften Umdrehung wurde das Gehwerk mit Öl geschmiert und gleich darauf war eine ansehnliche Beschleunigung der Rotation aus den abgelesenen Zeiten zu ersehen, wie die Tabelle zeigt.

Wie bei dem Wortmannschen Klinostaten, versuchte ich auch hier, ein genaueres Studium von der Umdrehung in kleinen Unterteilen zu machen. Es geschah dies wieder mit Hülfe des Chronoskopes. Erst benutzte ich das Kymographion, und liess die Scheibe des Klinostaten einen elektrischen Strom schliessen, jedesmal wenn ihr Umkreis 8 mm weiter rotiert war. Zu diesem Zweck wurde eine neue lange Bandsäge mittelst Schrauben um den Umkreis der Scheibe befestigt. Die Zähne ragten über die Oberfläche der Scheibe empor und waren 8 mm von einander entfernt. Sie berührten der eine nach dem anderen eine Kontaktfeder, wodurch — wie früher beschrieben — der Aluminiumschreibstift elektromagnetisch emporgehoben wurde und die Linie auf dem Russpapier des Kymographions den Kontakt somit registrierte. Die Wellenlinie des Chronoskopes unter der Klinostatenkurve zeigte wieder halbe Sekunden an.

Die Kurven zeigten, dass die Rotation in ihren Unterteilen sehr unregelmässig war; die Geschwindigkeit blieb kaum einen Augenblick konstant, doch die Veränderungen waren zwischen engen Grenzen beschlossen. Die aufeinanderfolgenden Umdrehungen zeigten keine Übereinstim-

mung derselben Unterteile. Die Unregelmässigkeiten rührten also nicht etwa von einer ungenauen Verteilung der Zähne der Bandsäge her. Der Unterschied zwischen den beiden Umdrehungshälften hatte fast immer dieselbe Orientierung; doch war sein Betrag nur gering, meistens zwischen 1 und 2 Sekunden.

Diese Methode wurde sehr vereinfacht, als ich die Bandsäge entfernte und den Umkreis der Scheibe mit aneinander geklebten Streifen Glacépapier bedeckte, welche mittelst der Petroleumflamme berusst wurden während einer Umdrehung der Klinostatenscheibe. Der Schreibstift der Mareyschen Trommel wurde schräg gegen die Oberfläche des Streifens gestellt und während der Rotation schrieb der Chronoskop die halben Sekunden direkt in den Russ auf dem Umkreis der Scheibe. Nach jeder Umdrehung zog ich das Stativ des Trommelchens ein wenig bei Seite, so dass 5 bis 7 Umdrehungen neben einander auf einen Streifen registriert werden konnten. Nachdem der Streifen durchgeschnitten und der Russ in Schellacklösung fixiert war, fing das Zählen und Messen der halben Sekunden an.

Wenn ich mit einem Lineal jedesmal die Entfernung von 10 halben Sekunden auf dem Streifen mass, waren diese Abstände immer um einen kleinen Betrag verschieden. Diese Unregelmässigkeit der Rotation ist vielleicht die Folge von der grossen inneren Reibung im Gehwerk des Klinostaten. Ich halte es für überflüssig, ein ausführliches Beispiel mitzuteilen. Nur gebe ich eine Tabelle welche das folgende zeigt. In jedem Oktant des Streifens wurde die Entfernung, welche in 80 halben Sekunden zurückgelegt war, in Millimetern gemessen. Daraus ist ein Maass für die durchschnittliche Schnelligkeit in jedem Oktante zu entnehmen, indem der gemessene Abstand etwas mehr als $^6/_7$ eines Oktantes einnimmt. 20 Januar 1905.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	im Durchschnitt.	
Oktant 1	240	245½	242	237½	240	240	239½	240½	
„ 2	244½	243½	244	243½	243½	243	245½	244	
„ 3	245	246½	246½	243½	244	243	244	244½	976½ mm pro Hälfte.
„ 4	246	245	245½	244½	245	243½	242½	244½	
„ 5	244	245½	244½	242½	242	241½	243½	243½	
„ 6	244½	241½	244½	240½	240½	241½	238½	241½	965½ mm pro Hälfte.
„ 7	141½	243	244	242	247	242	247	244	
„ 8	242	240	243	238	241	238	234½	239½	

Summe der beiden Hälften 1942 mm.
Unterschied „ „ „ 11 „

Der Unterschied von 11 mm stimmt überein mit etwas weniger als 2 Sekunden, also mit einer periodischen Ungleichmässigkeit von derselben Ordnung wie sie auch mit den anderen Methoden gefunden wurde.

Die Kurven lehrten mich nun noch zweierlei. Erstens dass geringe Änderungen der Stromspannung sich sofort zeigten in der Rotationsgeschwindigkeit des Motors. Die Spannung im Laboratorium war 110 bis 113 Volt. Wenn ein Akkumulator der Batterie hinzugefügt oder ausgeschaltet würde, vermehrte resp. verkleinerte die Geschwindigkeit des Klinostaten sich sogar derart, dass auch die Chronographenmethode dies gleich ans Licht brachte. Hierdurch kann jedoch keine periodische Ungleichmässigkeit entstehen. Zweitens zeigten die Kurven, dass ich auch hier künftig nur mit den Chronographen abzulesen brauchte. Denn wenn ich zugleich graphisch registrierte und mit den Chronographen die Zeiten bestimmte, erhielt ich denselben Betrag und dieselbe Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit, ungeachtet ihrer geringen Grösse.

Übrigens konnte ich aus den Kurven nur den Schluss ziehen, dass ein sehr genaues Studium der Rotationsunterteile wenig versprach und nicht die Mühe des vielen Zählens lohnen würde.

Über die Bestimmung der Ungleichmässigkeit brauche ich jetzt nur noch wenige Versuchstabellen mitzuteilen. Die meisten derselben dienten dazu, die Übereinstimmung zu untersuchen zwischen der periodischen Ungleichmässigkeit der Rotation und der geotropischen Reaktion der auf der Scheibe befestigten Pflanzen. Die erhaltenen sehr zahlreichen Tabellen zeigten eine periodische Ungleichmässigkeit, welche bei wenig belasteter Scheibe fast immer so orientiert war als wäre ein Übergewicht ungefähr bei Stift 1 vorhanden. Die Zeit für Stift 2 war mithin dann immer die längste; das Grössenverhältnis der 3 anderen Zeiten war ziemlich verschieden.

Es stellte sich jedoch heraus, dass die periodische Ungleichmässigkeit bei unbelasteter Scheibe nicht von einer einseitigen Gewichtsverteilung der Scheibe selbst verursacht wurde. Als ich später die Gleichmässigkeit der Rotation bei senkrechter Achse untersuchte, zeigte sich nämlich eine ebenso grosse periodische Ungleichmassigkeit, welche auch genau so orientiert war. Sei verschwand, als ich die im vorigen Kapitel erwähnte Bremsscheibe (Taf. V, 31) der Umdrehungsachse entfernte. Die geringe periodische Ungleichmässigkeit, welche bei horizontaler Achse einen Unterschied der beiden Umdrehungshälften von 1 oder 2 Sekunden verursachte, ist deshalb wahrscheinlich ebenso dieser Bremsscheibe zuzuschreiben. Meine Bestrebung, diese periodische Ungleichmässigkeit zu kompensieren durch Gewichte, welche ich in der Nähe von Stift 3 befestigte, hatten daher auch nicht den Erfolg dass eine Rotation ohne die geringste periodische Ungleichmässigkeit erreicht wurde. Es ist die Reibung der Umdrehungsachse gegen die Bremsscheibe dafür nicht konstant genug. Doch gelang es, die periodische Ungleichmässigkeit bis auf etwas weniger als eine Sekunde herabzusetzen, wie die folgenden Tabellen zeigen.

Die dabei erwähnten Kistchen, worin ich Keimlinge

rotieren liess, hatten, gefüllt mit feuchten Sägespänen oder Erde, ein Gewicht von etwas mehr als 1 kg.

19 Januar 1905. Der Klinostat hatte seit dem vorigen Tage gelaufen. Die Scheibe war belastet mit 2 symmetrisch befestigten Kistchen mit Sägespänen und Keimlingen. Ablesung mit der einfachen Chronographenmethode.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	im Durchschnitt.	
Stift 1		$86\frac{2}{4}$	$85\frac{3}{4}$	$85\frac{1}{4}$	86	$86\frac{1}{4}$	$85\frac{19}{20}$	
„ 2		87	$87\frac{1}{4}$	$86\frac{3}{4}$	$87\frac{3}{4}$	$86\frac{3}{4}$	$87\frac{2}{20}$	$173\frac{22}{120}$ Sek. pro Hälfte.
„ 3	$85\frac{2}{4}$	87	$85\frac{3}{4}$	86	$86\frac{1}{4}$	86	$86\frac{2}{24}$	
„ 4	$86\frac{1}{4}$	$85\frac{3}{4}$	$86\frac{3}{4}$	86	$85\frac{2}{4}$	$85\frac{2}{4}$	$85\frac{23}{24}$	$171\frac{109}{120}$ Sek. pro Hälfte.

Summe der beiden Hälften $345\frac{11}{120}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $1\frac{33}{120}$ „

Stift 2 braucht die längste Zeit; die 3 anderen Zeiten sind fast gleich gross. Der Unterschied der beiden Hälften ist gering, wie bei unbelasteter Scheibe, denn die Belastung ist symmetrisch befestigt.

23 Januar 1905. Der Klinostat hatte seit dem vorigen Tage gelaufen. Nur 1 Kistchen mit Sägespänen und Keimlingen ist befestigt in der Nähe von Stift 3. Ablesung wie oben.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8
Stift 1	$90\frac{3}{4}$	$91\frac{2}{4}$	$91\frac{2}{4}$	$92\frac{2}{4}$	92	$92\frac{2}{4}$	$91\frac{3}{4}$	$91\frac{3}{4}$
„ 2	$92\frac{3}{4}$	92	$92\frac{3}{4}$	$92\frac{1}{4}$	$92\frac{3}{4}$	$92\frac{1}{4}$	$92\frac{3}{4}$	91
„ 3	91	$91\frac{3}{4}$	$91\frac{3}{4}$	$92\frac{1}{4}$	$92\frac{1}{4}$	$91\frac{3}{4}$	$91\frac{2}{4}$	91
„ 4	91	91	$91\frac{2}{4}$	91	$91\frac{2}{4}$	91	$90\frac{3}{4}$	$89\frac{3}{4}$

Umdrehung.	9	10	11	im Durchschnitt.	
Stift 1	$91\frac{3}{4}$	$90\frac{1}{4}$	$91\frac{3}{4}$	$91\frac{28}{44}$	$183\frac{32}{44}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	92	$90\frac{3}{4}$	$91\frac{3}{4}$	$92\frac{4}{44}$	
„ 3	$91\frac{1}{4}$	$90\frac{3}{4}$	91	$91\frac{21}{44}$	$182\frac{7}{44}$ „ „ „
„ 4	90	89	91	$90\frac{33}{44}$	

Summe der beide Hälften $365\frac{39}{44}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $1\frac{25}{44}$ „

Die periodische Ungleichmässigkeit ist fast wie oben. Die andere Befestigung der Belastung hat offenbar keinen sehr grossen Einfluss. Nur ist die Zeit von Stift 1 länger geworden, denn in dieser Zeit steigt das Gewicht bei Stift 3.

25 Januar 1905. Umstände wie oben; in der Nähe von Stift 3 waren jedoch jetzt 2 Kistchen mit feuchter Erde befestigt.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Stift 1	$90\frac{2}{4}$	90	$90\frac{1}{4}$	90	$90\frac{2}{4}$	$90\frac{3}{4}$	$90\frac{2}{4}$	$91\frac{1}{4}$	$90\frac{3}{4}$	$91\frac{2}{4}$
„ 2	90	$90\frac{1}{4}$	90	90	90	$90\frac{2}{4}$	90	91	91	$91\frac{2}{4}$
„ 3	$89\frac{3}{4}$	90	$89\frac{2}{4}$	$89\frac{3}{4}$	$89\frac{2}{4}$	90	90	$90\frac{3}{4}$	$90\frac{3}{4}$	$91\frac{1}{4}$
„ 4	89	$89\frac{3}{4}$	$88\frac{3}{4}$	89	$88\frac{1}{4}$	$89\frac{2}{4}$	$89\frac{3}{4}$	90	90	$90\frac{3}{4}$

Umdrehung.	11	12	13	14	im Durchschnitt.	
Stift 1	91	$91\frac{1}{4}$	$91\frac{2}{4}$	91	$90\frac{43}{56}$	$181\frac{16}{56}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	91	91	90	91	$90\frac{29}{56}$	
„ 3	91	$91\frac{1}{4}$	90	90	$90\frac{14}{56}$	$179\frac{50}{56}$ „ „ „
„ 4	$90\frac{1}{4}$	$90\frac{1}{4}$	90	$89\frac{3}{4}$	$89\frac{36}{56}$	

Summe der beiden Hälften $361\frac{5}{28}$ Sek.
Untersch. „ „ „ $1\frac{11}{28}$ „

Die periodische Ungleichmässigkeit ist ungefähr wie oben; der Zeit von Stift 1 ist jedoch die grösste geworden, indem das stärkere Übergewicht bei Stift 3 in dieser Zeit steigt. Zwar ist die Zeit von Stift 4 noch immer die kürzeste, doch ist dies auf Rechnung des Reibungsminimums der Umdrehungsachse gegen die Bremsscheibe zu stellen.

11 Februar 1905; 2 Stunden nachdem der Motor in Gang gesetzt worden war. Ich hatte bei Stift 3, ein wenig nach der Seite von Stift 2, ein eisernes Gewicht von 2 kg befestigt. Dieses Übergewicht wirkte dem Reibungsmaximum der Umdrehungsachse entgegen und der Betrag der periodischen Ungleichmässigkeit verminderte dadurch bis auf weniger als 1 Sekunde, wie folgende Tabelle zeigt:

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8
Stift 1	$90\frac{1}{4}$	90	$90\frac{2}{4}$	91	91	91	$90\frac{3}{4}$	$90\frac{2}{4}$
„ 2	$91\frac{1}{4}$	$91\frac{1}{4}$	91	$91\frac{3}{4}$	91	$91\frac{2}{4}$	$91\frac{1}{4}$	$91\frac{3}{4}$
„ 3	$90\frac{3}{4}$	$91\frac{1}{4}$	91	$91\frac{2}{4}$	91	$91\frac{3}{4}$	$91\frac{1}{4}$	$91\frac{1}{4}$
„ 4	$91\frac{1}{4}$	$90\frac{3}{4}$	$90\frac{1}{4}$	92	$90\frac{2}{4}$	$91\frac{3}{4}$	91	$91\frac{2}{4}$

Umdrehung.	9	im Durchschnitt.	
Stift 1	$90\frac{2}{4}$	$90\frac{22}{36}$	$182\frac{20}{36}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	$91\frac{2}{4}$	$91\frac{13}{36}$	
„ 3	91	$91\frac{7}{36}$	$181\frac{26}{36}$ „ „ „
„ 4	91	$91\frac{4}{36}$	

Summe der beiden Hälften $364\frac{5}{18}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $\frac{5}{6}$ „

Die Zeit zumal von Stift 1 war noch zu kurz, weshalb ich jetzt ausser dem Gewicht von 2 kg noch ein Gewicht von ½ kg an die Scheibe befestigte zwischen Stift 3 und 4. Es verringerte sich der Unterschied der beiden Rotationshälften bis auf ungefähr $^1/_5$ Sekunde, wie folgende Tabelle zeigt.

13 Februar 1905; $1\frac{1}{4}$ Stunden nachdem der Motor in Gang gesetzt worden war.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8
Stift 1	$90\frac{2}{4}$	$91\frac{1}{4}$	$91\frac{1}{4}$	$91\frac{2}{4}$	91	$91\frac{1}{4}$	$91\frac{1}{4}$	$90\frac{3}{4}$
„ 2	$90\frac{3}{4}$	$90\frac{2}{4}$	$91\frac{3}{4}$	$91\frac{3}{4}$	$91\frac{1}{4}$	91	$91\frac{1}{4}$	$90\frac{3}{4}$
„ 3	91	$91\frac{1}{4}$	91	91	$91\frac{2}{4}$	$90\frac{3}{4}$	$90\frac{3}{4}$	$90\frac{2}{4}$
„ 4	91	91	$91\frac{3}{4}$	$91\frac{3}{4}$	$91\frac{1}{4}$	$90\frac{3}{4}$	$91\frac{2}{4}$	90

Umdrehung.	9	im Durchschnitt.	
Stift 1	$90\frac{2}{4}$	$91\frac{1}{36}$	
„ 2	$90\frac{3}{4}$	$91\frac{3}{36}$	$181\frac{35}{36}$ Sek. pro Hälfte.
„ 3	$90\frac{1}{4}$	$90\frac{32}{36}$	
„ 4	$91\frac{1}{4}$	$91\frac{5}{36}$	$182\frac{6}{36}$ „ „ „

Summe der beiden Hälften $364\frac{5}{36}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $\frac{7}{36}$ „

Als ich 2 Tage später die Rotation unter diesen selben Umständen nochmals bestimmte, erhielt ich dieselbe Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit, doch der Unterschied der beiden Umdrehungshälften war jetzt zugenommen bis auf $^4/_5$ Sekunde. Ich nahm noch einige geringen Änderungen der Belastung vor, doch erreichte keine vollkommen gleichmässige Rotation. Die Reibung der Umdrehungsachse war für diesen Zweck zu veränderlich. Doch zeigen die angeführten Tabellen aufs deutlichste, dass selbst der schwere Mollsche Motorklinostat in der Gleichmässigkeit seiner Umdrehung sehr beeinflusst wird von einem Übergewicht der Belastung.

Es bleibt mir nun übrig, das Verhalten der Rotation bei senkrechter Umdrehungsachse zu beschreiben. Bei einer Neigung zur Horizontalen zwischen 0° und 90°

wird die Art der Rotation immer mehr dem Verhalten bei senkrechter Achse gleich werden, so dass ich diesen Fall ausser Betracht lassen kann.

Die Gleichmässigkeit der Rotation bei senkrechter Achse wurde bei folgenden Klinostaten untersucht:

a. Der Wortmansche Klinostat, schweres Modell, verfertigt von der Firma P. J. Kipp und Söhne.

b. Der Motorklinostat, konstruiert nach den Angaben von Prof. J. W. Moll.

Der Wortmannsche Klinostat wurde wieder bei der schnellsten der 3 Geschwindigkeiten untersucht, also mit einer Umlaufzeit von ungefähr 12 Minuten. Der Umkreis der horizontalen Messingscheibe auf dem oberen Achsenende wurde genau in 4 gleich grosse Teile verteilt. An diesen 4 Stellen wurden 4 Löcher gebohrt, worin 4 gleich lange Platinstifte befestigt wurden. Die 4 Stifte standen in derselben horizontalen Ebene.

Ich benutzte wieder die nämlichen Quecksilberkontakte, welche früher beschrieben wurden; nur war jedes Röhrchen senkrecht in einem kleinen leicht verstellbaren Stativ gefasst. Die Ablesungen fanden statt mit der automatischen Chronographenmethode mit 3 Kontakten, so dass die Zeit über 81° eines Quadranten bestimmt werden konnte, indem noch 9 Sekunden übrig blieben für die Beobachtung der Stellung des Sekundenzeigers. Ich führe nur wenige Versuchstabellen an. Diejenige, welche die gleichmässigste Rotation zeigte, ist die folgende.

27 Mai 1906. Scheibe unbelastet.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8
Stift 1	164$\frac{2}{4}$	165$\frac{2}{4}$	166	165$\frac{3}{4}$	165	165$\frac{2}{4}$	166	164$\frac{1}{4}$
„ 2	163$\frac{3}{4}$	163	164$\frac{3}{4}$	165	165$\frac{1}{4}$	166$\frac{2}{4}$	165$\frac{3}{4}$	161$\frac{1}{4}$
„ 3	164	164$\frac{2}{4}$	167	164$\frac{3}{4}$	166	168$\frac{1}{4}$	164$\frac{3}{4}$	163$\frac{1}{4}$
„ 4	163$\frac{2}{4}$	165	166$\frac{1}{4}$	165$\frac{1}{4}$	164$\frac{2}{4}$	166$\frac{1}{4}$	165$\frac{2}{4}$	160$\frac{2}{4}$

UMDREHUNG.	9	10	IM DURCHSCHNITT.	
Stift 1	$160\frac{3}{4}$	$161\frac{3}{4}$	$164\frac{21}{40}$	
„ 2	$158\frac{3}{4}$	$159\frac{3}{4}$	$163\frac{15}{40}$	$327\frac{28}{40}$ Sek. pro Hälfte.
„ 3	$161\frac{3}{4}$	159	$164\frac{13}{40}$	
„ 4	$160\frac{2}{4}$	$159\frac{1}{4}$	$163\frac{26}{40}$	$328\frac{7}{40}$ „ „ „

Summe der beiden Hälften $655\frac{35}{40}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $\frac{19}{40}$ „

Es ist hier zwar eine periodische Ungleichmässigkeit zu erkennen, indem der zweite und vierte Quadrant schneller gehen als der erste und dritte. Doch ist der Betrag der Unterschiede gering. Und wenn an verschiedenen Zeitpunkten die Ablesungen wiederholt wurden, war die Grössenanordnung der Quadranten immer wieder verschieden. Es war also keine konstante und einseitig wirkende Ursache vorhanden.

1 Juni 1906. Scheibe in der Mitte belastet mit einem Topf mit feuchter Erde und Keimlingen, welche zusammen ein Gewicht von 1,05 kg hatten.

UMDREHUNG.	1	2	3	4	5	6	7
Stift 1	161	$159\frac{3}{4}$	162	$159\frac{3}{4}$	$161\frac{1}{4}$	$161\frac{3}{4}$	$162\frac{3}{4}$
„ 2	$159\frac{2}{4}$	$160\frac{3}{4}$	161	$159\frac{2}{4}$	$161\frac{3}{4}$	$162\frac{3}{4}$	$163\frac{3}{4}$
„ 3	161	$162\frac{1}{4}$	$160\frac{2}{4}$	$162\frac{3}{4}$	$165\frac{3}{4}$	$164\frac{3}{4}$	$164\frac{2}{4}$
„ 4	$161\frac{2}{4}$	$163\frac{3}{4}$	$159\frac{2}{4}$	$163\frac{1}{4}$	$163\frac{1}{4}$	164	$167\frac{3}{4}$

UMDREHUNG.	8	IM DURCHSCHNITT.	
Stift 1	166	$161\frac{25}{32}$	$323\frac{11}{32}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	$163\frac{2}{4}$	$161\frac{18}{32}$	
„ 3	$166\frac{2}{4}$	$163\frac{16}{32}$	$327\frac{3}{32}$ „ „ „
„ 4	$165\frac{3}{4}$	$163\frac{19}{32}$	

Summe der beiden Hälften $650\frac{7}{16}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $3\frac{3}{4}$ „

Auch hier wurde bei Ablesungen des nämlichen Versuches an anderen Zeitpunkten eine etwas andere Grössenanordnung der Quadranten gefunden, jedoch war die Zeit von Stift 4 immer die längste und die von Stift 2 immer die kürzeste. Die periodische Ungleichmässigkeit zeigt sich somit auch hier, so bald nur die Scheibe eine normale Belastung trägt, welche schwierig ganz genau zu zentrieren wäre. Ich habe die Beziehung zwischen Übergewicht und Orientierung der Ungleischmässigkeit nicht untersucht.

Der Mollsche Motorklinostat wurde mit senkrechter Achse untersucht mittelst der automatischen Chronographenmethode mit 3 Kontaktfedern, welche so gestellt waren dass die Zeit über 80° eines Quadranten bestimmt wurde. Die Umlaufzeit wurde gewählt wie früher bei den Versuchen mit horizontaler Achse.

26 Mai 1906. Scheibe unbelastet.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stift 1	$79\frac{3}{4}$	$83\frac{2}{4}$	$78\frac{1}{4}$	$82\frac{1}{4}$	$78\frac{3}{4}$	$82\frac{3}{4}$	$84\frac{3}{4}$	82	$80\frac{2}{4}$
„ 2	$78\frac{2}{4}$	$82\frac{2}{4}$	$84\frac{2}{4}$	$78\frac{2}{4}$	$82\frac{1}{4}$	84	$83\frac{2}{4}$	82	84
„ 3	$82\frac{2}{4}$	$84\frac{1}{4}$	$75\frac{3}{4}$	78	$78\frac{1}{4}$	$83\frac{1}{4}$	$83\frac{1}{4}$	85	$81\frac{3}{4}$
„ 4	$79\frac{1}{4}$	$80\frac{2}{4}$	$76\frac{3}{4}$	$77\frac{3}{4}$	$80\frac{3}{4}$	$82\frac{3}{4}$	79	84	77

Umdrehung.	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Stift 1	$76\frac{1}{4}$	$76\frac{1}{4}$	77	$83\frac{2}{4}$	$82\frac{3}{4}$	$77\frac{1}{4}$	$82\frac{2}{4}$	$77\frac{2}{4}$	$78\frac{3}{4}$
„ 2	$76\frac{3}{4}$	$76\frac{3}{4}$	$78\frac{2}{4}$	83	84	$79\frac{3}{4}$	$85\frac{2}{4}$	$78\frac{3}{4}$	84
„ 3	$75\frac{3}{4}$	$76\frac{1}{4}$	$78\frac{1}{4}$	79	77	82	77	78	$84\frac{1}{4}$
„ 4	$76\frac{1}{4}$	$76\frac{2}{4}$	83	$79\frac{1}{4}$	$78\frac{2}{4}$	$84\frac{1}{4}$	$77\frac{3}{4}$	$78\frac{2}{4}$	81

Umdrehung.	19	im Durchschnitt.
Stift 1	$82\frac{1}{4}$	$80\frac{26}{76}$ } $161\frac{65}{76}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	82	$81\frac{39}{76}$ }
„ 3	$76\frac{3}{4}$	$79\frac{57}{76}$ } $159\frac{13}{76}$ „ „ „
„ 4	$76\frac{1}{4}$	$79\frac{32}{76}$ }

Summe der beiden Hälften $321\frac{2}{76}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $2\frac{52}{76}$ „

Ungeachtet der vielen Unregelmässigkeiten in der Rotationsgeschwindigkeit stellt sich die periodische Ungleichmässigkeit deutlich heraus. Die Zeit von Stift 2 ist die längste. Es war dies auch der Fall bei noch zwei anderen Versuchstabellen, welche unter gleichen Umständen mit senkrechter Achse erhalten wurden und resp. 15 und 22 Umdrehungen enthielten. Jedesmal genügten schon 10 Umdrehungen um die periodische Ungleichmässigkeit deutlich zu zeigen.

Ich entfernte jetzt die Bremsscheibe von der Umdrehungsachse und bestimmte die Rotation von neuem mit unbelasteter Scheibe. 28 Mai 1906.

Umdrehung.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Stift 1	82	$82\frac{1}{4}$	$82\frac{1}{4}$	$81\frac{3}{4}$	$82\frac{1}{4}$	$81\frac{1}{4}$	$81\frac{1}{4}$	$81\frac{2}{4}$	$81\frac{3}{4}$
„ 2	$82\frac{2}{4}$	82	$81\frac{3}{4}$	$81\frac{2}{4}$	$81\frac{3}{4}$	$81\frac{1}{4}$	$80\frac{3}{4}$	$81\frac{2}{4}$	$80\frac{3}{4}$
„ 3	$81\frac{1}{4}$	82	$81\frac{3}{4}$	82	$81\frac{1}{4}$	$81\frac{2}{4}$	$81\frac{1}{4}$	$81\frac{1}{4}$	$81\frac{1}{4}$
„ 4	$82\frac{1}{4}$	81	82	81	$81\frac{2}{4}$	$80\frac{3}{4}$	$81\frac{2}{4}$	$81\frac{3}{4}$	$81\frac{2}{4}$

Umdrehung.	10	11	im Durchschnitt.
Stift 1	$81\frac{2}{4}$	$82\frac{1}{4}$	$81\frac{36}{44}$ } $163\frac{20}{44}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	82	$82\frac{1}{4}$	$81\frac{28}{44}$ }
„ 3	$81\frac{2}{4}$	$82\frac{3}{4}$	$81\frac{27}{44}$ } $163\frac{10}{44}$ „ „ „
„ 4	$81\frac{3}{4}$	$82\frac{3}{4}$	$81\frac{27}{44}$ }

Summe der beiden Hälften $326\frac{15}{22}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $\frac{5}{22}$ „

Die Tabelle zeigt eine besonders gleichmässige Rotation, welche fast ohne jede periodische Ungleichmässigkeit ist. Zwei andere Versuchstabellen, resp. über 14 und 22 Umdrehungen, ergaben dasselbe Resultat. Die Rotation war sehr gleichmässig und die scheinbare periodische Ungleichmässigkeit änderte jedesmal ihre Orientierung, so dass keine wirkliche Periodizität anwesend war.

Die Reibung der Bremsscheibe war also Ursache gewesen, dass gerade Stift 2 immer die längste Zeit brauchte.

Es folgt aus all dem angeführten dass sogar der Lauf dieses kräftigen Motors sehr beeinflusst wird durch ungleichmässige Reibungswiderstände, so wohl wie durch ein Übergewicht der Belastung. Man darf deshalb nicht von vornherein annehmen, dass ein Motorklinostat gleichmässig drehe wenn nur der Motor eine sehr viel grössere Kraft besitzt als für die von ihm verlangte Arbeit nötig ist.

Bei senkrechter Achse jedoch hat der Mollsche Klinostat ohne Bremsscheibe einen gleichmässigen Gang und ist er für heliotropische Versuche geeignet.

Eine schwere Belastung ändert die Regelmässigkeit seines Ganges bei senkrechter Achse nicht, wie ich aus einigen Versuchen erfuhr. Die genau horizontal gestellte Scheibe wurde dazu belastet mit einer Pflanze in einem Topf, welche zusammmen 31 kg wogen. Es machte dabei keinen Unterschied, ob der Topf in die Mitte oder nahe an den Rand der Scheibe gestellt wurde.

Bei horizontaler Achse kann die Bremsscheibe nicht gut entbehrt werden, weil sonst die Rotation zu unregelmässig wird durch die stetigen Änderungen im Eingriff der beiden konischen Zahnräder.

Bei unbelasteter Scheibe und horizontaler Achse tritt auch bei Entfernung der Bremse noch eine periodische Ungleichmässigkeit auf. Für die periodische Ungleichmässigkeit bei horizontaler Achse müssen also noch andere Ursachen bestehen als der genannte Reibungswiderstand

der Bremsscheibe und das eventuelle Übergewicht der Belastung.

Nachdem die Art der Rotation bei einigen Klinostaten jetzt ausführlich untersucht worden ist, müssen wir sehen, wie sich die nicht untersuchten Klinostaten verhalten in Bezug auf die Gleichmässigkeit ihrer Rotation. Dazu werde ich die Gruppen der Klinostatenformen besprechen in derselben Reihenfolge, worin sie im ersten Kapitel erwähnt worden sind. Ich fasse dabei nur das Verhalten bei horizontaler Achse ins Auge. Bei senkrechter Umdrehungsache werden mehrere Klinostaten wahrscheinlich gleichmässig rotieren können.

Die erste Gruppe bildeten die Klinostaten, welche früher als der Sachssche gebaut wurden. Es finden sich darunter keine Instrumente, welche für die heutigen Laboratorien noch einigen Wert hätten. Ihre Konstruktionen sind teils auch später angewendet worden, teils sind sie nur von historischem Interesse.

Von der zweiten Gruppe war der Sachssche Klinostat der wichtigste. Ich nenne sie Pendelklinostaten, indem sie von einem Gewichte getrieben und von einem Pendel reguliert werden. Ihre Tragkraft ist eine so geringe, dass sie nur wenig Anwendung gefunden haben. Bei genauer Zentrierung werden sie keine periodische Ungleichmässigkeit in der Rotation zeigen. Wohl aber bei einem geringen Übergewicht, wegen des Spielraumes im Eingriff der Zähne, wie auf Seite 181 erklärt wurde. Die Pendelregulierung wird von dem geringen Übergewicht wenig beeinflusst; bei etwas grösserem Übergewicht jedoch kommt die Rotation zum Stehen, so dass die periodische Ungleichmässigkeit hier nie einen ansehnlichen Betrag erreichen kann.

Die Klinostaten der dritten Gruppe sind Federklinostaten mit Ankerregulation. Sie sind viel

mehr gebraucht worden und rotieren bei genauer Zentrierung der Last ziemlich gleichmässig. Doch ist ihre Tragkraft gering und werden in den meisten Fällen periodische Ungleichmässigkeiten von geringem Betrage nicht zu vermeiden sein, erstens wegen des Spielraumes im Gehwerk, zweitens wegen der Beeinflussung des Ganges durch das eventuelle geringe Übergewicht. Bei grösserem Übergewicht kommt auch hier der Klinostat bald zum Stehen, so dass die periodische Ungleichmässigkeit keinen grossen Betrag erreichen wird.

Die Federklinostaten mit Flügelregulation stellen die vierte Gruppe dar. Hierzu gehören der Pfeffersche und der Wortmannsche Klinostat, welche die ausgedehnteste Anwendung gefunden haben. Ich habe gezeigt, dass ihr Gang vom dem geringsten Übergewicht beeinflusst wird, und dass bei vielen Versuchen Übergewichte von solchem Betrage unentdeckt bleiben dass daraus grosse periodische Ungleichmässigkeiten in der Rotation entstehen. Die üblichen Zentrierungsvorrichtungen sind nicht im stande, die Lasten genügend zu zentrieren und wenn sie es schon könnten, würde die Zentrierung durch Wasserverlust und dergleichen doch nach kurzer Zeit wieder so unvolkommen sein, dass von neuem eine periodische Ungleichmässigkeit eintreten würde.

Die erst in jüngerer Zeit gebrauchte fünfte Gruppe, die der Motorklinostaten, verspricht besseres als die vier anderen Gruppen. Nur ist zu beachten, dass auch die Rotation eines kräftigen Motors von einem Übergewicht beeinflusst wird. Offenbar wird darauf nicht genug geachtet, denn K. Linsbauer nennt als einen besonderen Vorzug des Wiesnerschen Motorklinostaten, „dass das zeitraubende Äquilibrieren der Versuchstöpfe, welches die Uhrwerkklinostaten verlangen, hier vollständig in Wegfall kommt. Der Motor ist hinreichend kräftig, um auch bei horizontaler Achse vollkommen exzentrisch fixierte Blumen-

töpfe zu rotieren" [1]. Newcombe dagegen giebt die Notwendigkeit des Zentrierens zu, wo er sagt: „Of course, the loads must be balanced, and this is done as on any Klinostat" [2].

Ein Ubergewicht der Belastung kann durch die auf Seite 255, unter 2, 4 und 5 genannten Ursachen eine periodische Ungleichmässigkeit der Rotation verursachen. Bei der Konstruktion eines Motorklinostaten soll man diesen Ursachen Rechnung tragen und mithin dafür sorgen, dass eine gute Zentrierung, eine gute Regulierung der Riemenspannung und ein spielfreier Gang möglich sind. Selbstverständlich dürfen keine ungleichmässigen Reibungen vorkommen, deren Periode mit dem Umlauf der Umdrehungsachse zusammenfällt.

---

1) K. Linsbauer, Universalklinostat mit elektrischem Betrieb nach Prof. J. Wiesner, l. c. 1904, S. 36

2) F. C. Newcombe, Klinostats and Centrifuges for physiological Research, l. c. 1904, S. 433.

KAPITEL III.

Der Einfluss einer periodischen Ungleichmässigkeit der Klinostatendrehung auf die Wurzeln von Keimlingen.

Die Hauptforderung, welche einem Klinostaten gestellt werden soll, ist dass ihre Rotation eine gleichmässige sei. Scheinbar genügen die gebräuchlichen Klinostaten dieser Forderung. Ihre Erfinder haben Gewicht darauf gelegt, eine gelinde und stossfreie Rotation zu erhalten welche mittelst Flügelregulation oder in anderer Weise erreicht wurde.

In dem vorigen Kapitel ist gezeigt worden, dass eine solche Rotation oft gar keine gleichmässige zu sein braucht. Sie zeigt nur zu leicht eine periodische Ungleichmässigkeit, welche den Zweck der Ausschliessung geotropischer Krümmungen verfehlen lässt. Wie klein diese periodischen Ungleichmässigkeiten sein dürfen um doch noch geotropische Krümmungen hervorrufen zu können, wird aus den in diesem Kapitel beschriebenen Versuchen hervorgehen. Zugleich wird gezeigt werden, dass die nicht periodischen Schnelligkeitsänderungen der Motorklinostaten und die ruckweise Rotation des von mir konstruierten Klinostaten den Zweck des Klinostaten wenig beeinträchtigen.

Es liegen nur wenige Untersuchungen vor über die genauere Bestimmung von Reizschwellen und Unterschieds-

schwellen der geotropischen Sensibilität der Pflanzenorgane. Einen wichtigen Beitrag dazu wurde neuerdings von H. Fitting[1]) geliefert. Auf Grund seiner Experimente mit zum Teil neu ausgedachten Versuchsmethoden kommt Fitting zu dem Schluss, dass die Pflanzen in jedem kleinsten Zeitpunkt den Schwerereiz zu perzipieren vermögen[2]) und dass geotropische Reaktionen schon ausgelöst werden von viel schwächeren Reizen als bisher bekannt war. Fitting arbeitete jedoch nicht mit der Methode der ungleichmässigen Umdrehung der Klinostatenachse. Er gab den Vorzug seiner „Methode der gleichmässigen Umdrehung der schräg gestellten Klinostatenachse bei Kombination von Stellungen, in denen die geotropischen Erregungen eine verschiedene Grösse haben" [3]). Doch hat er „oft genug gesehen, dass geotropische Erfolge schon dann am Klinostaten eintreten können, wenn die Zentrierung der Achse nicht genau vorgenommen worden war, sowohl bei schneller wie auch bei langsamer Rotation" [4]).

Fitting erwähnt nicht, wie gross die Ungenauigkeit der Zentrierung und wie gross die daraus resultierende Ungleichmässigkeit der Rotation sein soll um eben den Beginn einer geotropischen Reaktion hervorzurufen.

M. Wachtel[5]) erwähnt einen Versuch mit „constanter schneller Drehung (1 Umlauf in 4½ Minuten), aber mit ungleichmässiger Geschwindigkeit (in der oberen und unteren Hälfte des Umlaufs waren die Drehungsgeschwin-

---

1) H. Fitting, Untersuchungen über den geotropischen Reizvorgang. Jahrb. für wiss. Botanik, Bd. 41, 1905, S. 221.

2) l. c. S. 303.

3) l. c. S. 290.

4) l. c. S. 290.

5) M. Wachtel, Zur Frage über den Geotropismus der Wurzeln. Schriften der Naturforschergesellschaft in Odessa, Bd. 23, 1899 (in russischer Sprache). Zitiert nach dem Referat von W. Rothert in Bot. Ztg., Bd. 57, IIte Abt. 1899, Sp. 227.

digkeiten um ca. 1 Minute verschieden)" [1]. Die Wurzeln zeigten geotropische Krümmungen, indem die periodische Ungleichmässigkeit also 1 Minute von 4½ Minuten, d. i. ungefähr 22% betrug.

H. Dutrochet erhielt ebenfalls geotropische Krümmungen bei Keimlingen, welche mit ungleichmässiger Schnelligkeit um eine horizontale Achse rotierten. Er bestimmte die Ungleichmässigkeit der Rotation mittelst eines Pendels, das halbe Sekunden markierte und fand, dass bei einer Umdrehungszeit von 2 Minuten die eine Hälfte einer Umdrehung in 54 Sekunden, die andere Hälfte in 66 Sekunden zurückgelegt wurde [2]. Die periodische Ungleichmässigkeit war also 8 Sekunden oder 6²/₃ %.

Eine noch viel grössere Empfindlichkeit der Pflanzenorgane für ungleichmässige Rotation wird von F. C. Newcombe [3] angegeben. Er erwähnt die Notwendigkeit einer guten Zentrierung der Belastung und lässt darauf folgen: „It has been shown in my own laboratory that, in a speed of one revolution in ten minutes, a periodic retardation of but a second or two, due to excentricity of load, will cause, after a long interval, a geotropic curve by the summation of stimuli" [4].

Näheres wird hierüber nicht mitgeteilt. Es ist daher nicht deutlich, ob die Achse während jeder Umdrehung von 10 Minuten einmal 2 Sekunden still stand, oder ob die zwei Hälften der Umdrehung in um 2 Sekunden verschiedenen Zeiten zurückgelegt wurden. Die periodische

---

1) l. c. Sp. 232.

2) H. Dutrochet, l. c. 1824, S. 147—148. Dasselbe in H. Dutrochet, l. c. 1837, S. 46.

3) F. C. Newcombe, Limitations of the klinostat as an instrument for scientific research. Science, N. S., Vol. 20. N°. 507, 16 Sept. 1904, S. 376—379.

4) l. c. S. 2 des Separatabdrucks.

Ungleichmässigkeit beträgt hier nur $^1/_3$ %. Mir ist nicht bekannt, ob irgendwo die Versuchsanstellung beschrieben oder das benutzte Pflanzenmaterial angedeutet worden ist.

Ich werde jetzt die Versuche beschreiben, welche die ausserordentlich grosse Empfindlichkeit der Keimwurzeln für eine periodische Ungleichmässigkeit der Rotation ans Licht bringen. Es wird in dieser Schrift noch nicht die Rede sein von der genauen Bestimmung einer unteren Reizschwelle. Zweck ist nur, zu beweisen dass diese Schwelle so niedrig ist, dass sie überragt wird von der unvermeidlichen periodischen Ungleichmässigkeit der jetzt gebrauchten Klinostaten.

Das von mir benutzte Material bestand aus Keimwurzeln der folgenden Pflanzen:

a. *Vicia faba* L., grosssamige Varietät (Gartenpuffbohne).

b. *Vicia faba* L., mittelgrosssamige Varietät (grosse Ackerbohne).

c. *Vicia faba* L., kleinsamige Varietät (kleine Ackerbohne).

d. *Lupinus albus* L.

e. *Pisum sativum* L., (grüne Erbse).

Keimwurzeln bieten für diese Versuche die folgenden Vorteile:

a. Sie sind geotropisch sehr empfindlich.

b. Sie wachsen in einem dunklen Boden, wodurch Unterschiede von Licht und Feuchtigkeit keinen Einfluss üben können.

c. Sie sind so klein, dass viele Exemplare in einem Rezipienten gepflanzt und zugleich gedreht werden können.

d. Die Befestigung an die Achse wird dadurch sehr erleichtert.

e. Die individuellen Unterschiede werden durch die Menge der Pflanzenexemplare mit genügender Sicherheit eliminiert.

Bei geotropischen Untersuchungen ist das letztgenannte

eine sehr wichtige Sache. Nur zu leicht können individuelle Abweichungen der Versuchspflanzen zu irrigen Schlüssen Anlass geben, zumal bei Keimwurzeln, denn diese führen sehr oft spontane Nutationen aus. Dieser Umstand hat gewiss einen wichtigen Einfluss geübt zu-Gunsten des Baues der grossen Klinostaten, welche zahlreiche Versuchspflanzen zugleich drehen können.

Die gestellte Frage ist nur auf statistischem Wege zu beantworten. Bei den angewendeten, sehr geringen geotropischen Induktionen, zeigen sich so kräftige spontane Nutationen der Keimwurzeln, dass eine gewisse Zahl der letzteren nötig ist um eine etwa bevorzugte Wachstumsrichtung erkennen zu lassen. Wenn Keimwurzeln parallel mit der horizontalen Klinostatenachse befestigt werden, zeigen sie während einer gleichmässigen Rotation doch Ablenkungen ihrer Wachstumsrichtung, so dass kaum ein einziges Exemplar gerade fortwächst und fast alle Wurzeln ansehnliche Krümmungen erhalten. Solche Erfahrungen werden von mehreren Autoren beiläufig erwähnt. Meine Versuche haben mir die Überzeugung gegeben, dass die Keimwurzeln im Boden nur deshalb senkrecht nach unten wachsen, weil der geotropische Reiz unaufhörlich tätig ist um die spontanen Nutationen und die von äusseren Hindernissen verursachten Krümmungen wieder auszugleichen.

Die Samen wurden während 24 Stunden in Wasser geweicht. Dann pflanzte ich sie in lockere Sägespäne in einer grösseren Holzkiste. Die grossen und mittelgrossen Puffbohnen wurden einzeln mit der Mikropyle abwärts gepflanzt. Die kleineren Samen anfangs auch; bei den späteren Versuchen legte ich sie flach, indem die Keimwurzeln sich doch sogleich beim Austreten aus der Samenhülle senkrecht nach unten krümmten.

Nachdem die Wurzeln die gewünschte Länge erreicht hatten, wurden Keimlinge mit gesunden und geraden Wurzeln in die Kistchen mit feuchten Sägespänen oder feuchter

Erde gepflanzt, welche auf dem Klinostaten rotieren sollten. Die Kistchen waren aus 6½ mm dickem Lindenholz oder aus dünnen perforiertem Zinkblech angefertigt und hatten Teilungswände, damit der Keimbodem beim Rotieren nicht durch Druck eine ungleichmässige Verteilung erhielt. Die hölzernen Kistchen waren auswendig 13½ cm lang, 11¼ cm breit und 9½ cm hoch; sie hatten einen Deckel von perforiertem Zinkblech. Das Zinkblechkistchen war etwas grösser. Der Keimboden wurde vor dem Anfang eines jeden Versuches zwischen den Händen gerieben und war nicht zu locker und nicht zu fest angedrückt. Die benutzte Erde war ein Gemenge von gleichen Teilen Humus und Sand. Ich bohrte mit einem Glasstab für jeden Keimling ein Loch, worin der Keimwurzel gesteckt wurde. Die Länge der benutzten Keimwurzeln schwankte in den meisten Fällen zwischen 1 und 3 cm.

Um jeden Einfluss der Orientierung im Kistchen zu vermeiden, pflanzte ich die Keimlinge so, dass nach jeder der 4 Richtungen des Kistchens dieselbe Anzahl von Nabelenden der Puffbohnen gerichtet war, wie in Fig. 4 ersichtlich ist. Die eventuelle Sachssche Krümmung wurde selbstverständlich später nicht mitgerechnet.

Bei den späteren Versuchen, welche mit Samen von *Lupinus albus* angestellt wurden, pflanzte ich die geweichten Samen gleich in die Versuchskistchen. Die Exemplare in der grossen Holzkiste, welche zur Kontrolle dienten, zeigten mir wann die gewünschte Länge der Wurzeln erreicht war. Dieses Verfahren hatte den Nachteil, dass die Keimlinge nicht sorgfältig gewählt werden konnten, und den Vorteil, dass keine durch das Einpflanzen verursachten Störungen eintreten konnten. Ich konnte es zumal darum anwenden, weil bei diesen späteren Versuchen eine sehr grosse Zahl der Keimlinge für denselben Versuch benutzt wurde.

Die Undrehungsachse des Klinostaten wurde mit Hülfe

einer Wasserwage horizontal gestellt. Die Kistchen wurden so befestigt, dass die Wurzel sich immer parallel mit der Achse befanden. Die Rotation dauerte für jeden Versuch zwischen 16 und 28 Stunden.

Indem das Kistchen schnell auf die Achse befestigt und äquilibriert wurde, erhielt es verschiedene Stellungen, deren geotropische Induktionen sich gewiss ziemlich genau kompensiert haben.

Die Temperatur der Umgebung wurde bestimmt mit Hülfe zweier selbstregistrierenden Thermometer. Sie war in den meisten Fallen ungefähr 18° Celsius und wegen der zentralen Heizung des Laboratoriums fast konstant. Die spätesten Versuche fanden statt in einem Zimmer, worin durch komplizierte Vorrichtungen eine konstante Temperatur erhalten werden kann. Ich hielt die Temperatur auf 25° Celsius.

Bei jedem Versuch ist angegeben, durch welche Methode die Rotation bestimmt wurde. Diese Bestimmung geschah 2 oder 3 Mal während jedes Versuches, wobei immer dieselbe Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit gefunden wurde. Ich erwähne im folgenden nur die Durchschnittszeiten der 4 Quadranten.

Die Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit in Bezug auf die Richtung der Schwere ist bestimmt durch die Zeiten der 4 Kontaktstifte und die Stellung der Kontaktfeder.

Bevor die Versuchskistchen vom Klinostaten genommen wurden, notierte ich die Stellung der Kistchen in Bezug auf die 4 Stifte, was leicht geschehen konnte, weil sich auf jedem Kistchen ein Merkmal befand.

Ich nahm die Keimlinge mit einer Pinzette aus dem geöffneten Kistchen und achtete auf die Richtung, nach welcher die Wurzel eventuell gekrümmt war. Dabei stellte ich mich über das Kistchen um diese Richtung genau zu bestimmen. Dam wurde in einen Grundriss des Kistchens

der Samen mit der Krümmungsrichtung der Wurzel eingezeichnet, wie Fig. 4 zeigt.

Im Anfang achtete ich genau auf die Stelle und Orientierung des Samens im Kistchen, die Länge der Wurzeln vor und nach dem Versuch, die Entfernung des Krümmungspunktes von der Spitze der Wurzel, und den Krümmungswinkel. Es war daraus jedoch nichts besonderes zu schliessen. Zwischen Orientierung, Wachstumsschnelligkeit und Krümmungswinkel einerseits und Krümmungsrichtung andrerseits war nicht die geringste Beziehung zu entdecken. Bei der grossen Menge der Versuchspflanzen habe ich in späteren Versuchen deshalb nur die Krümmungsrichtung der Wurzeln in den Grundrissen der Kistchen eingezeichnet.

Die Krümmungsrichtungen der Keimwurzeln in dem Grundriss wurden in der Form einer Rosette zusammengestellt, wie Fig. 5 zeigt. Die Übereinstimmung der Teile des Grundrisses und der Rosette ist hier durch Buchstaben angedeutet. Keimwurzeln, welche nicht gekrümmt waren oder welche eine ganz unregelmässige Krümmung in mehr als einer Richtung zeigten, wurden als Punkte innerhalb des Kreises der Rosette angedeutet, damit die ganze Zahl der Keimlinge aus der Rosette zu bestimmen wäre.

Bei fast allen Versuchen wurde die Orientierung der periodischen Ungleichmässigkeit nicht eher aus den Chronographenablesungen bestimmt als wenn die Rosette vollendet war. Dies geschah, weil mitunter etwas schiefe Krümmungen bei einzelnen Keimwurzeln vorkamen, welche einigen Spielraum in der genauen Bestimmung der Richtung erlaubten. Es musste hier die Richtung vorurteilsfrei bestimmt werden können. Wenn ich zuvor diese Orientierung schon kannte, sorgte ich dafür, die Stelle des Merkmals an der Unterseite des Kistchens nicht zu kennen.

Durch Kontrollversuche überzeugte ich mich fortwährend von der geotropischen Empfindlichkeit meines Materiales. Die Krümmungen der rotierenden Keimwurzeln waren

bisweilen ziemlich plötzlich, bisweilen mehr abgerundet, indem der Betrag des Krümmungswinkels die grösste Verschiedenheit aufwies.

Ich führe jetzt ein Beispiel ausführlich an, mit Angabe des Grundrisses des Versuchskistchens. Die übrigen Beispiele können dann kurz behandelt werden.

24 Januar 1905.

Vicia faba, kleinsamige Varietät, in Sägespäne gepflanzt. Als die Keimwurzeln ungefähr 1 $\frac{1}{4}$ cm lang waren, wurden 23 Keimlinge in ein hölzernes Kistchen mit feuchter Erde gepflanzt. Das Kistchen wurde auf die Scheibe des Motorklinostaten befestigt und rotierte während 18 Stunden. Temperatur 18°—19° Celsius. Die Rotation wurde bestimmt mit der einfachen Chronographenmethode.

Stift 1	$91\frac{28}{44}$	$183\frac{25}{44}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	$91\frac{41}{44}$	
„ 3	$91\frac{21}{44}$	$182\frac{3}{44}$ „ „ „
„ 4	$90\frac{26}{44}$	

Summe der beiden Hälft. $365\frac{7}{11}$ Sek.
Untersch. „ „ „ $1\frac{1}{2}$ „ , d. i. $< 1/2$ ‰.

Die Umdrehung ist am langsamsten, wenn Stift 2 von rechts nach unten dreht, denn die Kontaktfeder steht rechts in der horizontalen Ebene durch die Achse. Daraus ist zu schliessen, dass der Radius, welcher am längsten in der Nähe des niedrigsten Punktes der Umdrehung verweilt, durch einen Punkt zwischen Stift 1 und 2 geht. Wenn der 1e und 2e Quadrant gleich lange dauerten würde dieser Radius gerade durch Stift 1 gehen; jetzt liegt er mehr nach der Seite von Stift 2.

Die geotropische Induktion ist bei der ungleichmässigen Drehung nicht nach allen Seiten gleich gross. Je länger die Keimwurzeln mit einer bestimmten Seite nach unten

gewendet stehen, desto grösser wird die Induktion nach dieser Seite. Der genannte Radius zwischen Stift 1 und 2 deutet mithin diejenige Seite der Keimwurzeln an, welche die grösste geotropische Induktion empfindet. Ich werde ihn die Richtung der maximalen geotropischen Induktion nennen. Ihm gegenüber steht die Richtung der minimalen Induktion. Rechts und links von der Mittellinie, in welcher diese zwei Richtungen liegen, sind die Grössen der geotropischen Induktionen ungefähr symmetrisch verteilt und zwar so, dass diese Grösse von der maximal bevorzugten bis zur minimal bevorzugten Richtung stetig abnimmt.

Wenn die Unterschiede der Induktionen genügen um eine geotropische Krümmung der Keimwurzeln hervorzurufen, wird diese der Richtung der maximalen Induktion zugewendet sein. Man könnte sich denken, dass die Induktionen auf dem Querschnitt des geotropisch empfindlichen Teiles der parallel mit der Umdrehungsachse gestellten Keimwurzeln sichtbar wären. Sie würden dann gerade die beschriebene Anordnuug zeigen, d. h. ihre Grössen würden symmetrisch verteilt sein in Bezug auf die Richtung der maximalen Induktion. Die Wurzeln können so die Richtung der Schwere empfinden, wenn nur die Grössenunterschiede die Unterschiedsschwelle übersteigen.

Das Kistchen wurde am Ende der 18 Stunden geöffnet und ich bestimmte die Krümmungsrichtung der Keimwurzeln, wie Fig. 4 abbildet.

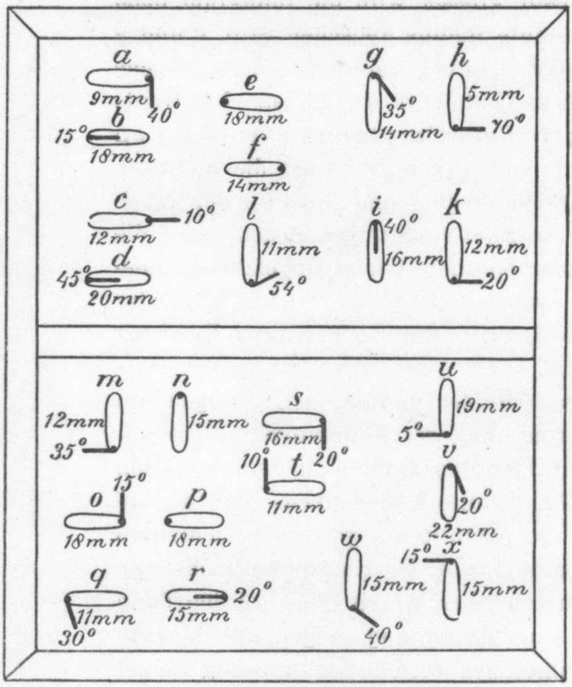


Fig. 4.

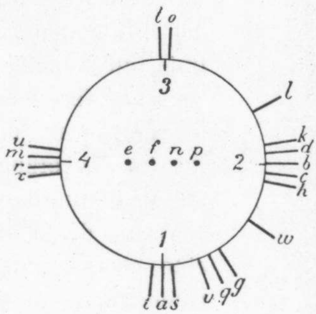


Fig. 5.

Aus diesem Grundriss des Kistchens mit den Keimlingen resultiert die Rosette in Fig 5. Die Wurzeln sind nicht alle nach der Richtung zwischen Stift 1 und 2 gekrümmt. Offenbar ist ihre Krümmungsrichtung nicht nur von den geotropischen Reizen, sondern auch noch von anderen Ursachen bedingt. Es sind dies ohne Zweifel die spontanen Nutationen und die zufälligen äusseren Hindernisse. Diese beiden Ursachen bedingen jedoch durchschnittlich eine allseitig symmetrische Anordnung der Krümmungsrichtungen. Wenn daher die Rosette eine einseitige Anordnung der Krümmungsrichtungen zeigt und die bevorzugte Richtung immer mit der Richtung der maximalen geotropischen

Induktion zusammenfällt, dürfen wir annehmen dass diese beiden Erscheinungen ursachlich mit einander zusammenhangen. In unserem Fall sind von den 23 Keimwurzeln 13 nach der Hälfte gekrümmt welche den Quadrant 1 bis 2 enthält, nämlich a, b, c, d, g, h, i, k, l, q, s, v, w; 6 nach der entgegengesetzten Hälfte, nämlich m, o, r, t, u, x; 4 zeigen keine bestimmte Krümmungsrichtung, von welchen p ihre gerade Richtung behalten hat und e, f und n mehrere unregelmässigen Krümmungen zeigen.

In diesem Versuch beträgt die Ungleichmässigkeit der Rotation nur 1½ Sek. pro 6 Minuten Umdrehungszeit, d. i. weniger als ½%. Doch zeigt die einseitige Rosette, dass dies genügt um eine geotropische Reaktion auszulösen.

Sachs erwähnt in seiner „Experimental-Physiologie"[1] den Fall dass ungleichmässige Rotation und Zentrifugalkraft zugleich ihre Wirkung auf Keimlinge ausüben. Er diskutiert den Fall theoretisch und erläutert ihn durch einen mechanischen Versuch ohne physiologische Bedeutung. Doch ist das Resultat auch bei Sachs eine derartige Ablenkung in der sonst allseitig symmetrischen Anordnung der Krümmungsrichtungen, dass diese mehr oder weniger demjenigen Radius zugeneigt sind, welcher am langsamsten den niedrigsten Punkt passiert. Wenn die periodische Ungleichmässigkeit der Rotation von einer exzentrischen Belastung herrührt, wird dieser Radius 90° hinter den Radius des Schwerpunktes zurückbleiben.

In den jetzt zu beschreibenden Versuchen brauchen wir ein Maass für die Einseitigkeit der geotropischen Induktionen, um die Versuche unter sich vergleichen zu können. Wegen der verschieden langen Umdrehungszeiten ist der Unterschied in der Zeitdauer der beiden Rotationshälften nicht dazu geeignet. Ich habe daher angegeben, wieviel

1) J. Sachs, Handbuch der Experimental-Physiologie der Pflanzen, Leipzig 1865, S. 108—109.

Prozente von der ganzen Umdrehungszeit dieser Unterschied ungefähr beträgt.

Der Schwerereiz wirkt einseitig auf die Keimwurzeln während einer Zeit, die übereinstimmt mit dem Unterschied in der Zeitdauer der beiden Rotationshälften. Die Wurzeln legen während dieser Zeit die Hälfte einer Umdrehung zurück, so dass der einseitig wirkende Komponent des Schwerereizes alle Werte von Null bis g durchläuft. Die wenigen Sekunden des Zeitunterschiedes representieren somit eine viel geringere geotropische Induktion, als wenn die Klinostatenachse während dieser kurzen Zeit still gestanden hätte. Bei jedem Versuch habe ich die Gesamtdauer der einseitigen geotropischen Induktion berechnet, und dabei die Worte „weniger als" hinzugefügt um auszudrücken, dass diese Gesamtdauer teils einer wenig wirksamen Stellung der gereizten Wurzel zugehört.

In dem hier behandelten Beispiel ist die Gesamtdauer weniger als $\frac{18 \times 1^1/_2 \times 60}{365^7/_{11}} = 4^1/_2$ Minuten.

Es erscheint diese Zeit als ausserordentlich gering und man wird nicht umhin können, der intermittierenden Reizung hier eine grosse Bedeutung für die geotropische Reaktion zuzuschreiben.

Von den kurz zu besprechenden Versuchen nenne ich nun zuerst zwei, in welchen die periodische Ungleichmässigkeit mehrere Prozente beträgt. Es fangen dann fast sämtliche Keimwurzeln während der Rotation an, nach der Richtung der maximalen geotropischen Induktion zu wachsen. Es ist dies der Fall, wenn der Wortmannsche Klinostat mit einer scheinbar gut zentrierten Belastung von ungefähr 1,8 kg rotiert, wie folgende Beispiele zeigen.

3 Januar 1905.

Vicia faba, grosssamige Varietät. Keimwurzeln 1 bis

3¼ cm lang. 23 Keimlinge in Sägespäne im Zinkblechkistchen gepflanzt. Während 26 Stunden gedreht auf dem Wortmannschen Klinostaten. Temperatur 18° Celsius. Rotation bestimmt mit der Scheibe mit 8 Nadeln, mit der senkrecht unter der Umdrehungsachse gestellten Kontaktfeder und dem grossen Sekundenzeiger der Weckeruhr.

Oktant 1	106		
„ 2	95¾	394¾ Sek. pro Hälfte.	
„ 3	93		
„ 4	100¼		
„ 5	109¾		
„ 6	108¼	439¾ „ „ „	
„ 7	113		
„ 8	109		

Summe der beiden Hälften 834½ Sek.
Unterschied „ „ „ 45 „ , d. i. < 5½ %.

Richtung der maximalen geotropischen Induktion zwischen Nadel 7 und 8. Von den 23 Keimwurzeln hatten sich 22 mit nur kleinen Ablenkungen in dieser Richtung gekrümmt. Nur 1 Exemplar war in der entgegengesetzten Richtung gebogen. Die Gesamtdauer der geotropischen Induktion war weniger als $\frac{26 \times 45 \times 60}{834\frac{1}{2}} = 84$ Minuten.

4 Januar 1905.

Vicia faba, mittelgrosssamige Varietät. Keimwurzeln ¼ bis 1¼ cm lang. 21 Keimlinge in Sägespäne im Zinkblechkistchen gepflanzt. Während 21 Stunden gedreht auf dem Wortmannschen Klinostaten. Temperatur 18° Celsius. Rotation bestimmt wie oben.

Oktant 1	$91\frac{1}{2}$		
„ 2	93	$372\frac{1}{2}$ Sek. pro Hälfte.	
„ 3	$93\frac{1}{2}$		
„ 4	$99\frac{1}{2}$		
„ 5	$107\frac{1}{2}$	405 „ „ „	
„ 6	$103\frac{1}{2}$		
„ 7	$94\frac{1}{2}$		
„ 8	$94\frac{1}{2}$		

Summe der beiden Hälften $777\frac{1}{2}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $32\frac{1}{2}$ „ , d.i. $> 4\,\%$.

Richtung der maximalen geotropischen Induktion nach Nadel 6. Die 21 Keimwurzeln waren alle ungefähr nach dieser Richtung gekrümmt. Die Gesamtdauer der geotropischen Induktion war weniger als $\frac{21 \times 32\frac{1}{2} \times 60}{777\frac{1}{2}} = 52\frac{1}{2}$ Minuten.

Von dem Wortmannschen Klinostaten gebe ich keine weiteren Beispiele, denn bei der üblichen Belastung ist hier die periodische Ungleichmässigkeit ungeachtet sorgfältiger Zentrierung immer so gross, dass völlig einseitige Rosetten erhalten werden.

Bei dem Motorklinostaten war die Ungleichmässigkeit sehr viel geringer; ich werde in den darauf bezüglichen Beispielen stets die Abbildung der Rosette beigeben.

In dem folgenden Versuche verursachte ich durch ein schweres Übergewicht eine ansehnliche Ungleichmässigkeit.

11 Januar 1905.

Vicia faba, mittelgrosssamige Varietät. Keimwurzeln 1 bis 4 cm lang. Keimlinge in Sägespäne gepflanzt, 32 im Zinkblechkistchen und 17 in einem hölzernen Kistchen. Während 20 Stunden gedreht auf dem Motorklinostaten, dessen Scheibe zwischen Stift 1 und 2 mit einem Übergewicht von 4 kg belastet war. Temperatur 18° Celsius. Rotation bestimmt mit der einfachen Chronographenmethode.

Stift 1	$79\frac{4}{20}$	}	
„ 2	$85\frac{8}{20}$	}	$167\frac{5}{20}$ Sek. pro Hälfte.
„ 3	$82\frac{2}{20}$	}	
„ 4	$76\frac{17}{20}$	}	$156\frac{1}{20}$ „ „ „

Summe der beiden Hälften $323\frac{8}{10}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $11\frac{1}{5}$ „ , d. i. $< 3^1/_2$ %.

Richtung der maximalen geotropischen Induktion nach Stift 2, ein wenig nach der Seite von Stift 1.

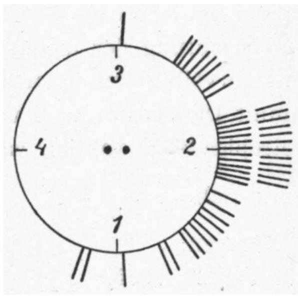


Fig. 6.

Wie Fig. 6 zeigt, hat weitaus die Mehrzahl der Keimwurzeln gerade in dieser Richtung eine Ablenkung von ihrer ursprünglichen Wachstumsrichtung erfahren. Die Gesamtdauer der geotropischen Induktion war weniger als $\frac{20 \times 11\frac{1}{5} \times 60}{323\frac{3}{10}} =$ $41\frac{1}{2}$ Minuten.

Wenn ich kein beabsichtigtes grosses Übergewicht an die Scheibe befestigte, betrug die periodische Ungleichmässigkeit weniger als 1%. Die Rosette war dann noch sehr deutlich einseitig, wie die beiden folgenden Beispiele zeigen.

23 Januar 1905.

Vicia faba, kleinsamige Varietät, in Sägespäne ausgesät.

Wenn die Keimwurzeln sichtbar waren, wurden 48 Keimlinge in feuchte Erde in zwei hölzernen Kistchen gepflanzt. 23 Stunden später befestigte ich die beiden Kistchen auf den Motorklinostaten. Rotation während 24 Stunden. Temperatur 18°—19° Celcius. Die Rotation wurde bestimmt mit der einfachen Chronographenmethode; Kontaktfeder wie immer rechts in der horizontalen Ebene durch die Umdrehungsachse.

Stift 1	$91\frac{27}{50}$		
„ 2	$93\frac{48}{50}$	$187\frac{24}{50}$ Sek. pro Hälfte.	
„ 3	$93\frac{26}{50}$		
„ 4	$92\frac{15}{50}$	$183\frac{42}{50}$ „ „ „	

Summe der beiden Hälften $371\frac{8}{25}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $3\frac{16}{25}$ „ , d. i. $< 1\ ^0/_0$.

Die Tabelle zeigt, dass die Richtung der maximalen geotropischen Induktion nach Stift 2 gewendet war, ein wenig an der Seite von Stift 3.

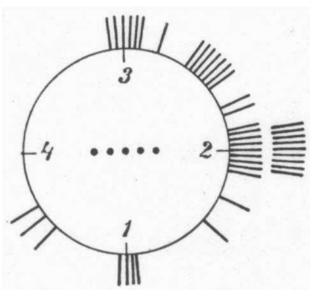


Fig. 7.

Fig. 7 zeigt, dass die Krümmungsrichtung der meisten Wurzeln völlig damit übereinstimmt. Die Gesamtdauer der geotropischen Induktion war weniger als $\frac{24 \times 3^{16}/_{25} \times 60}{371^{8}/_{25}} =$ 14 Minuten.

13 Januar 1905.

Pisum sativum. Keimwurzeln ungefähr $2^1/_2$ cm lang. 46 Keimlinge in Sägespäne im Zinkblechkistchen gepflanzt. Während 19 Stunden gedreht auf dem Motorklinostaten. Temperatur 17°—18° Celsius. Rotation bestimmt mit der automatischen Chronographenmethode; die 2 Kontaktfedern standen 65° voneinander entfernt Die erste Feder stand wie immer rechts in der horizontalen Ebene durch die Achse.

Stift 1	64	
„ 2	$64\frac{56}{60}$	$130\frac{18}{60}$ Sek. pro Hälfte.
„ 3	$65\frac{22}{60}$	
„ 4	$64\frac{9}{60}$	$128\frac{9}{60}$ „ „ „

Summe der beiden Hälften $258\frac{9}{20}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $2\frac{3}{20}$ „ , d. i. $< 1\ ^0/_0$.

Richtung der maximalen geotropischen Induktion nach Stift 2, ein wenig nach der Seite von Stift 3.

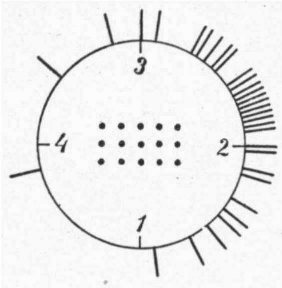


Fig. 8.

Wie Fig. 8 zeigt, sind die Krümmungen in der grossen Mehrzahl nach dieser Richtung gewendet, obwohl eine ziemlich grosse Zahl der Erbsenwurzeln keine Krümmung erfahren hatte. Die Gesamtdauer der geotropischen Induktion war weniger als $^{90}/_{65} \times \frac{19 \times 2^3/_{20} \times 60}{258^9/_{20}} = 13^1/_4$ Minuten.

Im zweiten Kapitel wurde erklärt, wie durch verschiedene Befestigung der Versuchskistchen die von der Reibung der Bremsscheibe verursachte periodische Ungleichmässigkeit zum Teil kompensiert werden konnte. Dadurch war es möglich, die Ungleichmässigkeit bis auf weniger als $^1/_2$ % zurückzuführen. Dass auch dann noch eine übereinstimmende Einseitigkeit in den Rosetten zu erkennen war, zeigen die beiden folgenden Beispiele.

7 Januar 1905.

Vicia faba, mittelgrosssamige Varietat. Keimwurzeln ungefähr 2 cm lang. 20 Keimlinge in Sägespäne im Zinkblechkistchen gepflanzt. Während 28 Stunden gedreht auf dem Motorklinostaten. Temperatur 19° Celsius. Rotation bestimmt mit dem grossen Sekundenzeiger der Weckeruhr; Kontaktfeder rechts in der horizontalen Ebene durch die Achse stehend.

Stift 1	$85\frac{14}{36}$	$171\frac{8}{36}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	$85\frac{25}{36}$	
„ 3	$85\frac{4}{36}$	$169\frac{18}{36}$ „ „ „
„ 4	$84\frac{14}{36}$	

Summe der beiden Hälften $340\frac{7}{12}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $1\frac{7}{12}$ „ , d. i. $< 1/2$ %.

Richtung der maximalen geotropischen Induktion zwischen Stift 1 und 2.

Wie Fig. 9 zeigt, sind die Krümmungen in dieser Richtung zahlreicher als in den anderen Richtungen. Die Gesamtdauer der geotropischen Induktion war weniger als

$$\frac{28 \times 1^7/_{12} \times 60}{340^7/_{12}} = 7^3/_4 \text{ Minuten.}$$

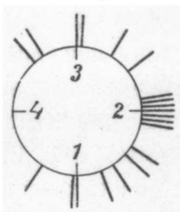


Fig. 9.

20 Januar 1905.

Vicia faba, kleinsamige Varietät, in Sägespäne ausgesät. Als die Keimwurzeln gerade sichtbar waren, wurden 46 Keimlinge in Sägespäne in zwei hölzernen Kistchen gepflanzt und 24 Stunden später auf den Motorklinostaten gebracht. Rotation während 24 Stunden. Temperatur 17°–18° Celsius. Die Rotation wurde bestimmt mit der einfachen Chronographenmethode und mit dem Chronoskope, das halbe Sekunden auf den Russpapierstreifen auf dem Umkreis der Scheibe registrierte. Beide Methoden zeigten, dass die Richtung der maximalen geotropischen Induktion sich zwischen Stift 1 und 2 befand, wie die Tabelle der durchschnittlichen Chronographenablesungen zeigt:

Stift 1	$88\frac{40}{60}$	(Stift 1 + 4) $176\frac{44}{60}$ „ „ „
„ 2	$89\frac{32}{60}$	(Stift 2 + 3) $178\frac{23}{60}$ Sek. pro Hälfte.
„ 3	$88\frac{51}{60}$	
„ 4	$88\frac{4}{60}$	

Summe der beiden Hälften $355\frac{7}{60}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $1\frac{13}{20}$ „ , d. i. < 1/2 %.

Wie Fig. 10 zeigt, stimmt die Hauptrichtung der Wurzelkrümmungen wieder mit der Richtung der maximalen geotropischen Induktion überein. Die Gesamtdauer der

geotropischen Induktion war weniger als $\frac{24 \times 1\frac{13}{20} \times 60}{355\frac{7}{80}} =$ $6\frac{3}{4}$ Minuten.

Bei diesem Versuche war durch das Chronoskop gezeigt worden, dass die Rotation des Motorklinostaten in den kleinsten Unterteilen sehr unregelmässig war. Doch ist die erhaltene Rosette sehr viel weniger einseitig als bei dem Wortmannschen Klinostaten und ist somit der Zweck des Klinostaten hier, ungeachtet der nicht so gelinden Bewegung, viel besser erfüllt als dort.

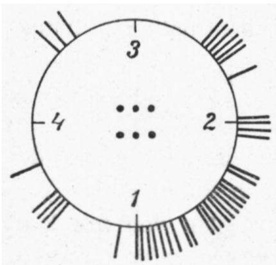


Fig. 10.

Wenn die periodische Ungleichmässigkeit sich noch verringert, wird auch die Rosette noch regelmässiger. Die regelmässigste Rosette, welche in den Versuchen mit dem Motorklinostaten in meinen Protokollen anwesend war, ist die folgende, welche jedoch nur eine geringere Zahl der Keimlinge enthält.

9 Januar 1905.

Vicia faba, mittelgrosssamige Varietät. Keimwurzeln ungefähr 2½ cm lang. 17 Keimlinge in Sägespäne im Zinkblechkistchen gepflanzt. Während 24 Stunden gedreht auf dem Motorklinostaten. Temperatur 20° Celsius. Rotation bestimmt wie beim vorletzten Versuche.

Stift 1	$85\frac{7}{16}$	$171\frac{8}{16}$ Sek. pro Hälfte.
„ 2	$86\frac{1}{16}$	
„ 3	$85\frac{4}{16}$	$170\frac{12}{16}$ „ „ „
„ 4	$85\frac{8}{16}$	

Summe der beiden Hälften $342\frac{1}{4}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $\frac{3}{4}$ „ , d. i. $< 1/4$ ‰.

Richtung der maximalen geotropischen Induktion nach Stift 1.

Wie Fig. 11 zeigt, sind die Krümmungen fast gleichmässig nach allen Seiten gerichtet. Doch ist die Hälfte von Stift 1 ein wenig bevorzugt. Die Gesamtdauer der geotropischen Induktion war weniger als $\frac{24 \times \frac{3}{4} \times 60}{342\frac{1}{4}} =$ 3 Minuten.

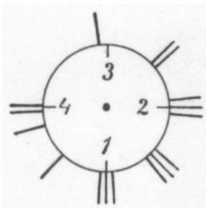


Fig. 11.

Ich illustriere die Empfindlichkeit der Keimlinge jetzt noch durch einige Versuche, welche mit dem von mir konstruierten Klinostaten angestellt wurden. Die Rotation war ruckweise. Die Umlaufzeit war 6 Minuten, indem die Umdrehungsachse nach jeder Sekunde einen Grad weiter drehte. Wenn die Achse aber an einen bestimmten Punkt der Umdrehung gekommen war, konnte ich sie jedesmal eine willkürlich bestimmte Zahl von Sekunden still stehen lassen. Diese Vorrichtung diente also um die Zeitschwelle für geotropische Reize zu ermitteln.

17 August 1906.

Lupinus albus. Von den geweichten Samen wurden 114 Stück in Sägespäne im Zinkblechkistchen und in 3 hölzernen Kistchen gepflanzt. Die Kistchen wurden horizontal gestellt bis die Keimwurzeln ungefähr 2½ cm lang waren. Dann wurden sie in der üblichen Stellung an die horizontale Umdrehungsachse des neuen Klinostaten befestigt und rotierten sie während 15 Stunden ohne periodische Ungleichmässigkeit. Umlaufzeit 6 Minuten. Temperatur 19° Celsius.

Fig. 12 zeigt, dass die Krümmungsrichtungen nicht einseitig verteilt sind, wenn auch bei noch grösserer Zahl der Keimlinge vielleicht eine noch regelmässigere Rosette zu erhalten wäre. Wenn ich von den 4 Kistchen gesondert die Rosetten bestimmte, war auch in keiner

dieser 4 Partialrosetten eine besonders bevorzugte Krümmungsrichtung zu erkennen.

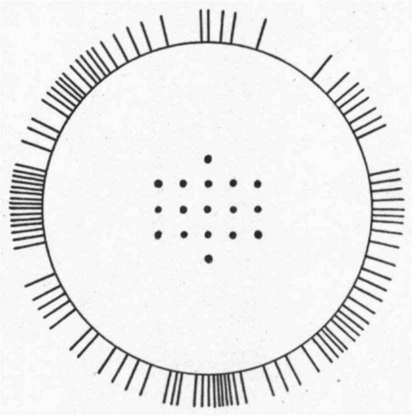


Fig. 12.

9 Februar 1907.

Lupinus albus. Von den geweichten Samen wurden 114 Stück in Sägespäne in einer grösseren, in 8 Teile verteilten Holzkiste gepflanzt, welche horizontal gestellt wurde bis die Keimwurzeln ungefähr 2 cm lang waren. Dann wurde die Kiste in der üblichen Stellung befestigt und rotierte sie während 16 Stunden. Die Umlaufzeit war 6 Minuten; in einer bestimmten Stellung trat bei jeder Umdrehung jedoch eine Ruhepause von 1 Sekunde ein. Der Radius, der während dieser Ruhepause senkrecht nach unten gerichtet war, ist in der Rosette durch R angedeutet. Temperatur 25° Celsius.

Fig. 13 lehrt, dass die einseitige geotropische Induktion sich deutlich zeigt in den Krümmungsrichtungen der Keimwurzeln, denn die Richtung R der Ruhepause ist sehr bevorzugt. Doch betrug die Pause nur 1 Sekunde in 6 Minuten d. i. weniger als $\frac{1}{2}$ %. Die Gesamtdauer der geotropischen Induktion war $\frac{16 \times 1 \times 60}{361} = 2\frac{2}{3}$ Minuten.

Bei der Befestigung der Kiste in der gewünschten

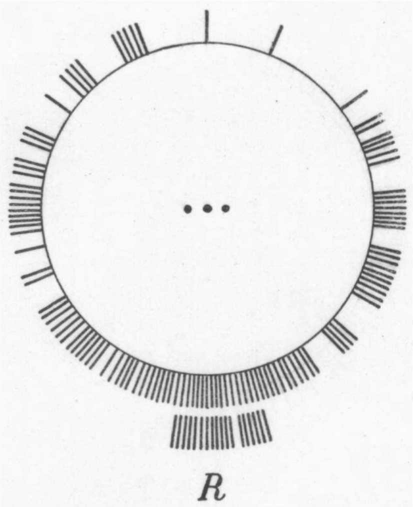


Fig. 13.

Stellung tritt während einiger kurzen Augenblicke eine geotropische Induktion im Sinne der Ruhepause ein. Ich gebe darum noch ein Beispiel, wobei diese Induktion durch eine längere entgegengesetzte mehr als aufgewogen wurde.

10 Februar 1907.

Lupinus albus. Von den geweichten Samen wurden 110 Stück in Sägespäne im Zinkblechkistchen und in 3 hölzernen Kistchen gepflanzt, welche horizontal gestellt wurden bis die Keimwurzeln ungefähr 2 cm lang waren. Dann wurden die Kistchen in der üblichen Stellung befestigt und rotierten sie während 18 Stunden. Umlaufzeit, Ruhepause und Temperatur wie beim vorigen Versuche.

Fig. 14 zeigt die Rosette, welche noch deutlich die Richtung R der Ruhepause bevorzugt. Es sind 65 Keimwurzeln nach der unteren Hälfte der Fig. 14 gekrümmt

und 35 nach der oberen Hälfte. Die Gesamtdauer der Induktion war $\frac{18 \times 1 \times 60}{361} = 3$ Minuten.

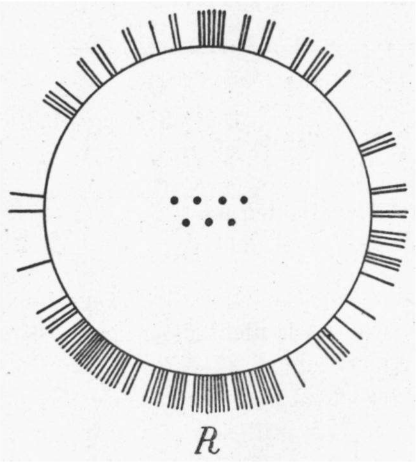


Fig. 14.

Die Versuche mit dem neuen Klinostaten müssen wiederholt und vermehrt werden um die präzise Reizschwelle der Keimwurzeln zu ermitteln. Doch habe ich sie hier schon mitgeteilt, weil die Umstände des Versuches hier einfacher sind als bei den anderen Klinostaten, wo die periodische Ungleichmässigkeit aus den durchschnittlichen Chronographenablesungen bestimmt werden muss.

Anhangsweise erwähne ich noch einen Versuch, der mit den Hypokotylen von *Helianthus annuus* angestellt wurde.

10 Juli 1906.

Helianthus annuus; Samen gesät in einen kleinen Topf mit Erde, der mit grobmaschiger Gaze überzogen wurde. Wenn die Hypokotyle im Dunkeln eine Länge von 2 bis 7 cm erreicht hatten, befestigte ich den Topf in den Topfhalter an der horizontalen Umdrehungsachse des

W o r t m a n nschen Klinostaten und äquilibrierte ihn sorgfältig. Die Hypokotyle standen parallel mit der Umdrehungsachse. Die Rotation wurde mehrmals bestimmt mit der automatischen Chronographenmethode.

Stift 1	$162\frac{17}{44}$	$339\frac{24}{44}$ Sek. pro Hälfte. (Stift 2, 3)
„ 2	$169\frac{25}{44}$	
„ 3	$169\frac{43}{44}$	
„ 4	$162\frac{35}{44}$	$325\frac{8}{44}$ „ „ „ (Stift 4, 1)

Summe der beiden Hälften $664\frac{8}{11}$ Sek.
Unterschied „ „ „ $14\frac{4}{11}$ „ , d. i. > 2 %.

Nachdem der Topf mehr als drei Tage lang im Dunkeln rotiert hatte, war noch nicht die geringste Krümmung der Hypokotyle zu erkennen.

Als ich dann die Umdrehungsachse aus dem Gehwerk schaltete und mithin still setzte, waren am nächsten Morgen alle Hypokotyle nach oben gekrümmt. Die hierdurch bewiesene geotropische Empfindlichkeit der Hypokotyle war also nicht gross genug um eine Reaktion auf die periodische Ungleichmässigkeit der Drehung von mehr als 2 % auszulösen.

KAPITEL IV.

Die Bedingungen für die Anwendung des Klinostaten bei horizontaler Achse.

Als Schlussfolgerung aus den beiden vorigen Kapiteln können zwei Bedingungen gelten, denen man Rechnung tragen soll beim künftigen Gebrauch des Klinostaten für reizphysiologische Untersuchungen. Die erste Bedingung ist, dass man sich überzeugen soll dass keine periodische Ungleichmässigkeit in der Rotation des benutzten Klinostaten anwesend sei. Die zweite Bedingung ist die Anwendung einer so grossen Zahl der Versuchspflanzen, dass der Einfluss der spontanen Nutationen eliminiert wird. Beide waren seit lange bekannt. Nicht bekannt war jedoch, dass mit ihrer Erfüllung grosse Schwierigkeiten verknüpft sind, welche mit Hülfe der heutigen Klinostaten kaum zu überwinden sind. Ich werde diese beiden Bedingungen nach einander etwas ausführlicher besprechen und schliesslich ihre Bedeutung für die Beurteilung der geotropischen Literatur angeben.

Im Anfang des zweiten Kapitels habe ich erwähnt, dass H. Dutrochet schon in 1824 eine periodische Ungleichmässigkeit in der Rotation entdeckte, welche von einem Übergewicht der Belastung verursacht wurde. Ebenfalls führte ich an, dass J. Sachs in 1874 die Notwendigkeit einer guten Zentrierung angab. Die Erfinder der Federklinostaten erkennen diese Notwendigkeit alle. So spricht

Wortmann von der Eliminierung des eventuellen Übergewichtes, „ohne dessen Vermeidung die Regelmässigkeit der Axenumdrehungen sehr gestört werden kann"[1])

Es mag Wunder nehmen, dass in der Literatur nicht angegeben wird, bis zu welchem Grade genau die Zentrierung geschehen soll. Der Wortmannsche Klinostat verlangsamt seine Bewegung bei horizontaler Achse bedeutend, so bald er belastet wird. Diese Verlangsamung wurde schon von Wortmann selbst konstatiert[2]). Doch ist daraus ohne weiteres zu entnehmen, dass die Drehung periodisch von einem Übergewicht beeinflusst werden muss.

Es gilt dies für alle Federklinostaten mit Flügelregulation. Wo Fitting erwähnt, dass bei seinen Pfefferschen Klinostaten „durch Vorversuche eine absolut gleichmässige Rotation sichergestellt worden war"[3]), ist gewiss nicht an eine bis auf eine Sekunde genaue Kontrollierung der Drehung zu denken. Im zweiten Kapitel ist ja gezeigt worden, dass ein mit der Zentrierungsvorrichtung nicht zu entdeckendes Übergewicht die Flügelregulation schon bedeutend beeinflusst. Dies gilt für die horizontale, und in entsprechend geringerem Maasse auch für die geneigte Achsenlage. Fitting giebt an, dass er die Zentrierung mit Hülfe der üblichen Lockerung der Umdrehungsachse vorgenommen hat[4]).

Wenn Pfeffer in seinem Handbuch erwähnt hat, dass man mit seinem Klinostaten gleichzeitig einige Blumentöpfe um die horizontale Achse in Drehung setzen kann, fügt er daran zu: „Besonders bei einer so ansehnlichen Inanspruchnahme muss für Aequilibrirung, d. h. dafür gesorgt sein, dass der Apparat in jeder Phase der Umdrehung

1) J. Wortmann, l. c. 1886, S. 246.
2) J. Wortmann, l. c. 1886, S. 248.
3) H. Fitting, l. c. 1905, S. 252.
4) l. c. S. 228.

ungefähr dieselbe Arbeit zu leisten hat" [1]). Die Worte „besonders" und „ungefähr" deuten keinen sehr hohen Grad der geforderten Genauigkeit der Zentrierung an. Doch ist jetzt sichergestellt, dass der Fehler der periodischen Ungleichmässigkeit dem Bau dieses Klinostaten inhärent ist, ungeachtet der genauesten Zentrierung.

Im dritten Kapitel wurde gezeigt, dass die geringste periodische Ungleichmässigkeit schon eine geotropische Reaktion der Keimwurzeln auslösen konnte, welche statistisch, mit Hülfe einer grösseren Zahl der Versuchspflanzen, ans Licht trat. Zwar ist ein einziger solcher Versuch nicht sehr beweisend, doch habe ich niemals eine Rosette erhalten, welche eine bevorzugte Wachstumsrichtung zeigte die der Richtung der maximalen geotropischen Induktion mehr oder weniger entgegengesetzt war. Es folgt hieraus, dass wenn auch bei weniger empfindlichen Versuchsobjecten als Keimwurzeln, eine Reaktion eben nicht eintreten wird, doch wenigstens eine einseitige geotropische Induktion von der periodischen Ungleichmässigkeit verursacht wird. Diese kann sich mit anderwärtigen Induktionen zusammenstellen und dadurch Fehler verursachen bei reizphysiologischen Untersuchungen.

Ich halte es darum für notwendig, dass man sich künftig von der Gleichmässigkeit der Rotation der benutzten Klinostaten überzeugt. Die beschriebene automatische Chronographenmethode ist dazu die zuverlässigste Methode. Um mit ihrer Hülfe ein sicheres Resultat zu erhalten, soll man die Ablesungen wenigstens so lange fortsetzen, bis die aus $\frac{n}{2}$ und aus n Umdrehungen berechnete periodische Ungleichmässigkeit die nämliche Orientierung zeigt. Eine andere, nicht statistische Methode ist unverwendbar wegen der vielen nicht periodischen Schnelligkeitsänderungen,

1) W. Pfeffer, l. c. Bd. II, 1904, S. 571.

welche übrigens den Zweck des Klinostaten wenig beeinträchtigen.

Am Schluss des zweiten Kapitels sind die verschiedenen Klinostatentypen bezüglich ihrer Gleichmässigkeit der Rotation mit einander verglichen. Es stellte sich heraus, dass nur die Motorklinostaten unter gewissen dort erwähnten Bedingungen künftig benutzt werden sollten. Wenn die Schwellen der geotropischen Empfindlichkeit später besser untersucht worden sind, kann vielleicht die physische Kontrolle der Drehung dieser Motorklinostaten durch eine physiologische mit Hülfe etwa der Keimwurzeln ersetzt werden. Diese ist weniger zeitraubend und wird durch das grössere Tragvermögen der Motorklinostaten besser ermöglicht.

Immerhin wäre es erwünscht, einen Klinostaten zu haben der durch andere Prinzipien ihres Baues keine periodische Ungleichmässigkeit zeigen sollte. Der von mir konstruierte Klinostat ist nach den folgenden Prinzipien konstruiert.

a. Die Triebkraft kann die Umdrehungsachse nur jedesmal etwas weiter drehen, wenn sie mit Hülfe eines Gesperres freigestellt wird. Die Bewegung ist somit ruckweise und der Spielraum im Eingriff der Zähne hat keinen Einfluss. Die Triebkraft ist ein Gewicht, dass sich jedesmal automatisch wieder aufzieht.

b. Die Regulierung ist völlig unabhängig von der Triebkraft und von der Belastung; sie wird geliefert von einem Pendeluhrwerk, das an bestimmten Zeitpunkten das Gesperre elektromagnetisch freistellt.

c. Die Stösse bei der ruckweisen Drehung werden gemildert erstens durch Windflügel; zweitens dadurch dass das Gesperre nicht sogleich auf die Umdrehungsachse wirkt, sondern durch ein Getriebe davon entfernt ist.

Man kann ferner der Umdrehungsachse jede Neigung geben. Das Instrument ist zugleich intermittierender Klinostat und hat besondere Vorrichtungen für die Bestimmung von Reiz- und Unterschiedsschwellen. Die Konstruktion dieses Klinostaten verbürgt eine Rotation ohne periodische Ungleichmässigkeit; er ist durch seinen komplizierten Bau jedoch nur für Untersuchungszwecken, nicht etwa für Demonstrationen u. d. g. anzuwenden. Wie in der Einleitung erwähnt, wird er bald ausführlich beschrieben werden.

Die zweite der genannten Bedingungen für den Gebrauch des Klinostaten war die Anwendung einer so grossen Zahl der Versuchspflanzen, dass der Einfluss der spontanen Nutationen eliminiert wird. Die spontanen Nutationen werden schon von den älteren Autoren erwähnt und Sachs hat sehr auf sie geachtet. Für seine Untersuchung über das Wachstum der Haupt- und Nebenwurzeln hat er sogar 10 Kilo Samen von *Vicia faba* und etwa 2 Kilo Erbsen benutzt [1]. Er sah diese Nutationen auf dem Klinostaten viel stärker auftreten und schrieb sie inneren, im Gewebe selbst liegenden Ungleichheiten zu [2].

In den im dritten Kapitel beschriebenen Versuchen hat sich herausgestellt dass die spontanen und von äusseren Hindernissen bedingten Nutationen ausserordentlich zahlreich sind. Fast alle Wurzeln krümmen sich bei gleichmässiger Rotation in einer zufälligen Richtung. Obwohl dergleiche Erfahrungen von vielen Autoren gelegentlich erwähnt werden, soll man diese Erscheinung doch noch mehr als bis jetzt in Rechnung bringen bei der Beurteilung der mit Hülfe des Klinostaten erhaltenen Versuchsresultate.

Wenn ich ein Kistchen mit Keimlingen, das etwa 24 Stunden gleichmässig rotiert hatte, in Ruhe setzte,

---

1) J. Sachs, l. c. 1873, S. 385.

2) l. c. S. 402.

waren nach einigen Stunden immer fast alle Spitzen der nach verschiedenen Richtungen gekrümmten Wurzeln nach unten gebogen. So ist im Boden die Schwere fortwährend tätig um alle die entstandenen Ablenkungen der geraden Richtung der Keimwurzeln wieder auszugleichen.

Das grössere Tragvermögen der neueren Klinostaten ist sehr vorteilhaft für die Anwendung einer grossen Zahl der Versuchspflanzen.

Schliesslich ist zu besprechen, inwiefern die Resultate dieser Untersuchung die Beurteilung der geotropischen Literatur beeinflussen könnten. Allerdings unterscheidet sich diese Literatur durch zahlreiche Widersprüche in den erhaltenen Resultaten. Die Streitfrage über die Gehirnfunktion der Wurzelspitze und über das Verhältnis der unter verschiedenem Neigungswinkel einwirkenden geotropischen Induktionen sind Beispiele davon. Wenn darüber die verschiedensten und völlig entgegengesetzten Meinungen verkündigt sind, ist dies vielleicht zum Teil dem Mangel eines zuverlässigen Klinostaten zuzuschreiben.

Doch soll man den Einfluss dieses Mangels nicht überschätzen. Viele geotropischen Untersuchungen sind nicht mit Keimwurzeln, sondern mit Hypokotylen und Stengeln angestellt, welche eine geringere Empfindlichkeit besitzen und weniger spontane Nutationen zeigen. Vielleicht ist die geringere Lokalisation der Streckungszone hier günstiger für die Erhaltung der geraden Richtung. Obwohl über die Reiz- und Unterschiedsschwellen hier noch manches zu untersuchen ist, lässt sich doch für die Stengelorgane besseres erwarten, auch auf Grund des am Schluss des dritten Kapitels erwähnten Versuches mit den Hypokotylen von *Helianthus annuus*.

Wenn man also die erhaltenen Schlüsse der geotropischen Literatur grössenteils aufrecht halten kann, so ist doch künftig der eventuelle Fehler der periodischen Ungleichmässigkeit zu vermeiden. Wo die von ihm verursachte

geotropische Induktion eben noch keine Reaktion auslöst, kann sie sich doch — wie oben erwähnt — mit den zu untersuchenden Induktionen zusammenstellen und dadurch zu irrigen Schlüssen Anlass geben.

GRONINGEN, am 10 März 1907.

INHALTSÜBERSICHT.

Seite.

Einleitung 173

KAPITEL I.

Die Prinzipien im Bau der bis jetzt konstruierten Klinostaten.

Die ältesten Klinostaten 175
Der Sachssche Klinostat 178
Die anderen Pendelklinostaten 180
Die Federklinostaten mit Ankerregulation 182
Die Federklinostaten mit Flügelregulation 187
Der Mollsche Klinostat 192
Die anderen Motorklinostaten 197

KAPITEL II.

Die Ungleichmässigkeit in der Rotation der Klinostaten.

Die Notwendigkeit einer gleichmässigen Rotation . 201
Die untersuchten Federklinostaten 202
Die möglichen Ursachen der Ungleichmässigkeit ihrer Rotation 203
Die einfachsten Methoden um die periodische Ungleichmässigkeit zu bestimmen 204
Die anfängliche Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit 208
Die Bestimmung der periodischen Ungleichmässigkeit mittelst des Kymographions. 210

Seite.

Die Übereinstimmung der einfachen Chronographenmethode mit der Kymographenmethode 215
Die Münsterbergsche Uhr zur Bestimmung von Reaktionszeiten 218
Die automatische Chronographenmethode und ihre Vorteile 219
Die periodische Ungleichmässigkeit wird nicht von einer schiefen Stellung des Gelenkes der Umdrehungsachse verursacht 224
Die Ursache der periodischen Ungleichmässigkeit liegt nicht im Gehwerk des Klinostaten selbst. . . . 226
Ein Übergewicht, das mit der Zentrierungsvorrichtung nicht aufzufinden ist, verursacht schon eine periodische Ungleichmässigkeit der Rotation des Wortmannschen Klinostaten 230
Dasselbe gilt für die Pfefferschen Klinostaten . . 245
Eine schnellere Drehung wird noch stärker vom Übergewicht beeinflusst als eine langsamere 248
Die Untersuchung des Mollschen Motorklinostaten mittelst der Chronographenmethoden 252
Die möglichen Ursachen einer ungleichmässigen Rotation der Motorklinostaten 255
Die anfängliche Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit des Motorklinostaten 256
Der Gang des Motorklinostaten wird periodisch von einem Übergewicht beeinflusst 258
Die graphische Bestimmung der Ungleichmässigkeit 262
Die Rotation wird nicht nur von einer einseitigen Reibung, sondern auch von geringeren Übergewichten beeinflusst 265
Die Rotation des Wortmannschen und Mollschen Klinostaten bei senkrechter Achse 269
Die Rotation der nicht untersuchten Klinostaten bei horizontaler Achse 275

KAPITEL III.

Der Einfluss einer periodischen Ungleichmässigkeit der Klinostatendrehung auf die Wurzeln von Keimlingen.

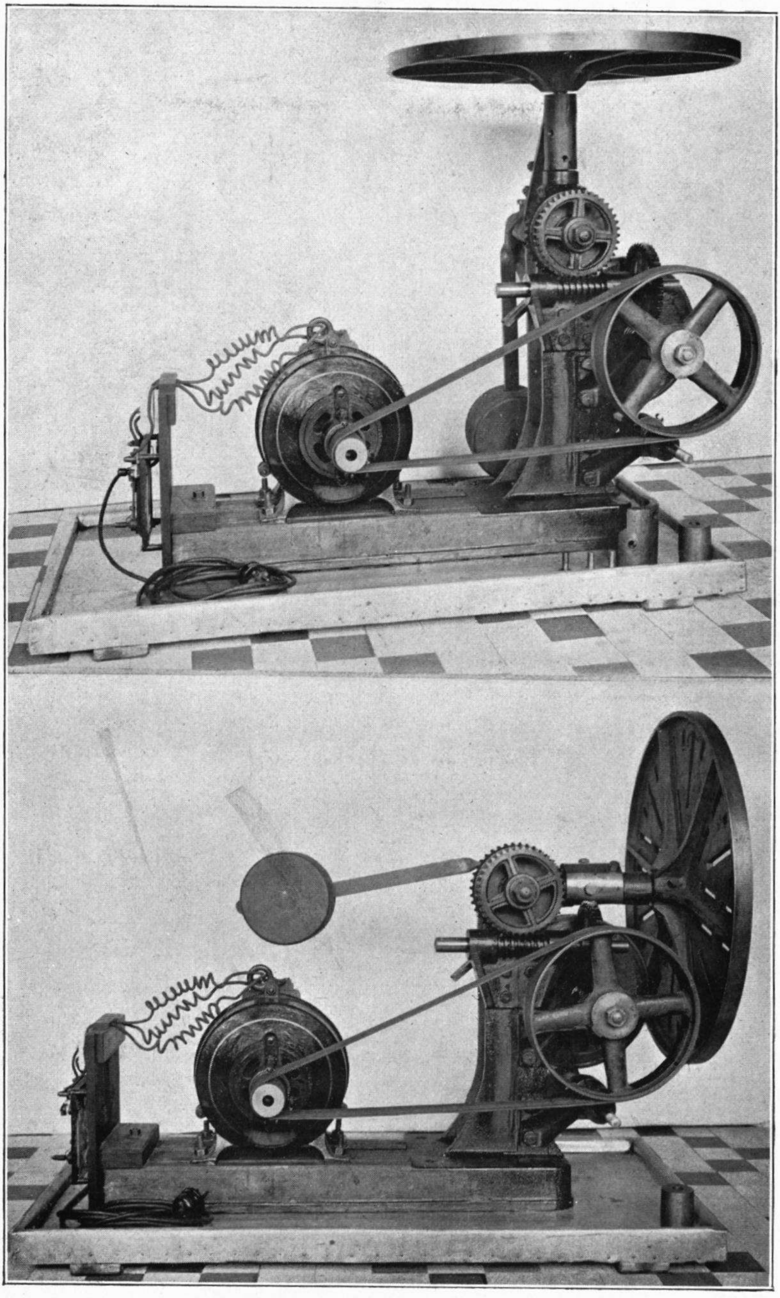
Seite.

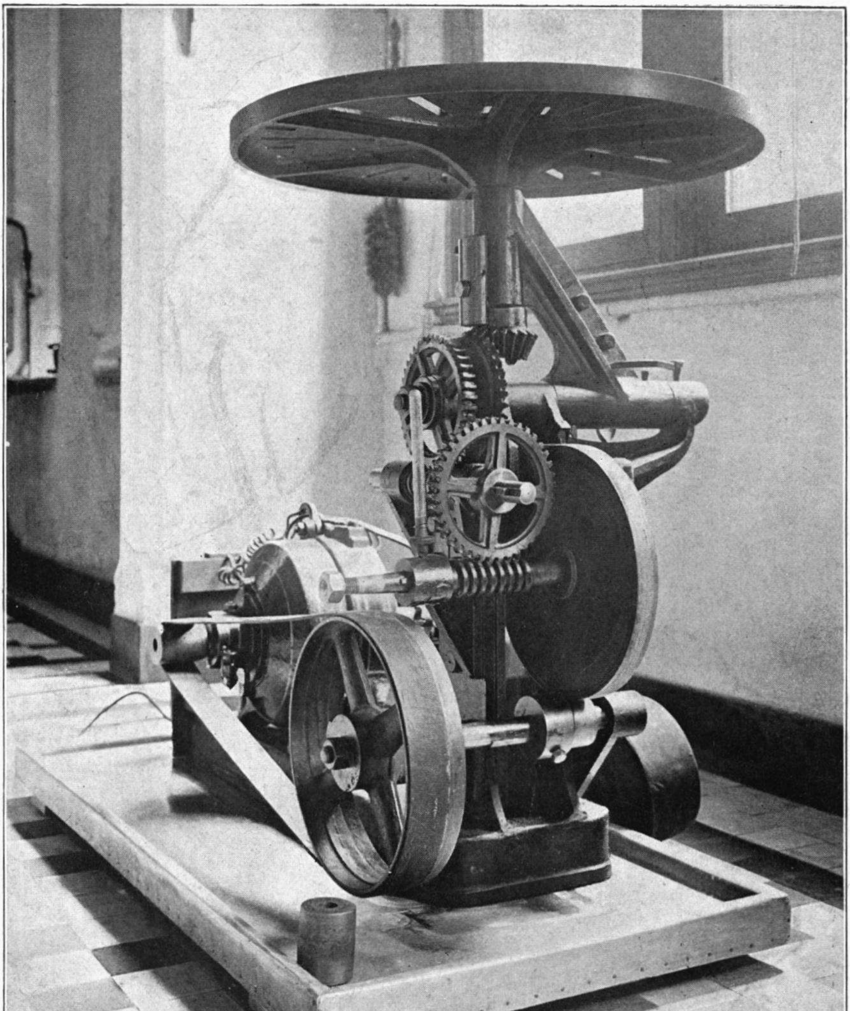
Die Grenzen der geotropischen Sensibilität der Pflanzenorgane 278
Die Vorteile der Benutzung von Keimwurzeln . . . 281
Die benutzte Methode 282
Ausführliches Beispiel 286
Die Unzulänglichkeit des Wortmannschen Klinostaten 290
Der Einfluss von sehr geringen periodischen Ungleichmässigkeiten 292
Versuche mit dem von mir konstruierten Klinostaten 298

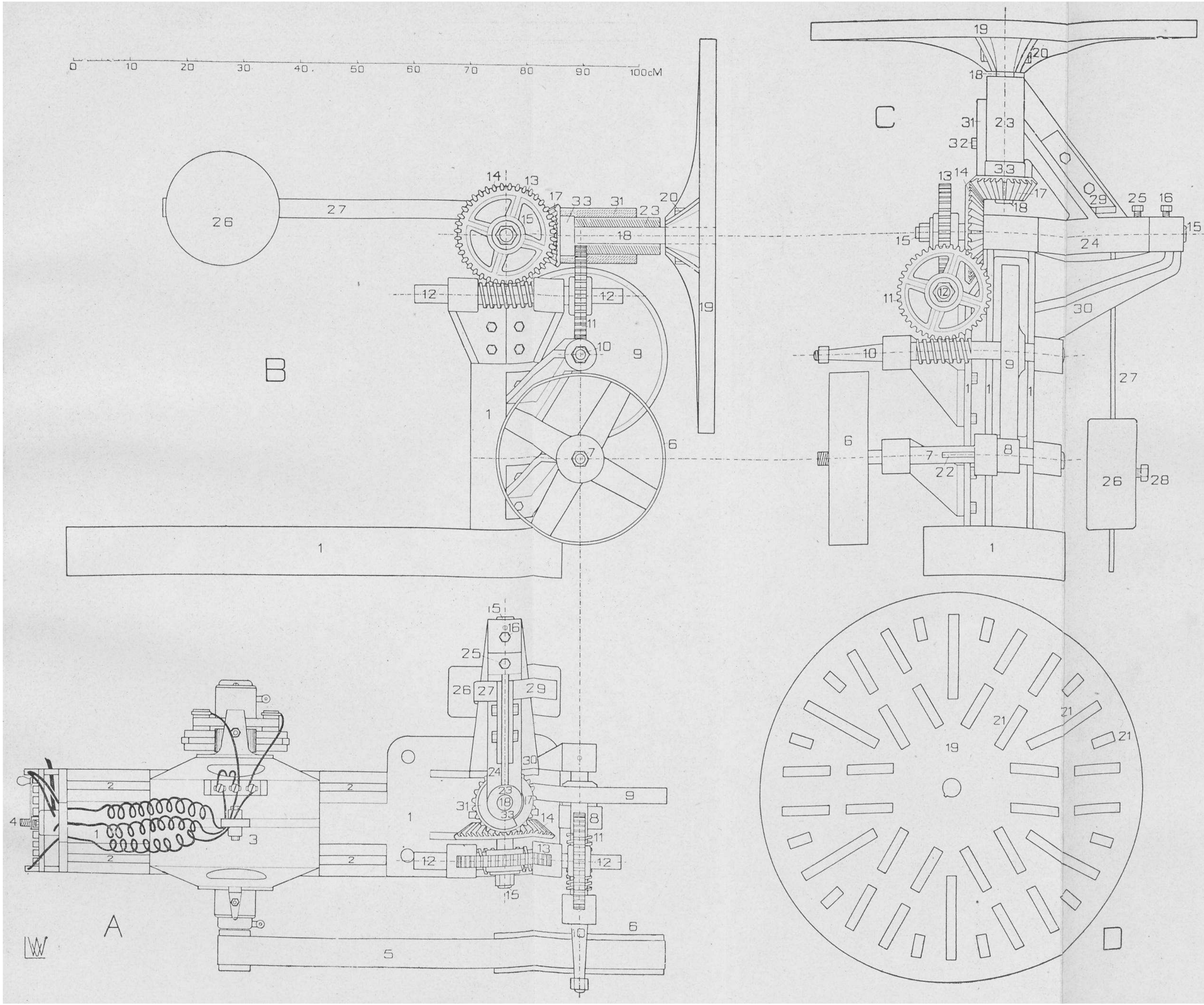
KAPITEL IV.

Die Bedingungen für die Anwendung des Klinostaten bei horizontaler Achse.

Die Notwendigkeit der genauen Kontrollierung der Klinostatendrehung 303
Die Prinzipien eines Klinostaten, der keine periodische Ungleichmässigkeit der Rotation zeigen kann . . 306
Das Eliminieren der spontanen Nutationen 307
Die Bedeutung der ungleichmässigen Rotation der Klinostaten für die geotropische Literatur . . . 308






0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100cM
A
B
C
D